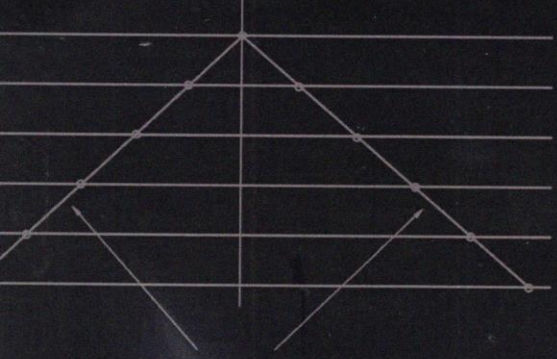
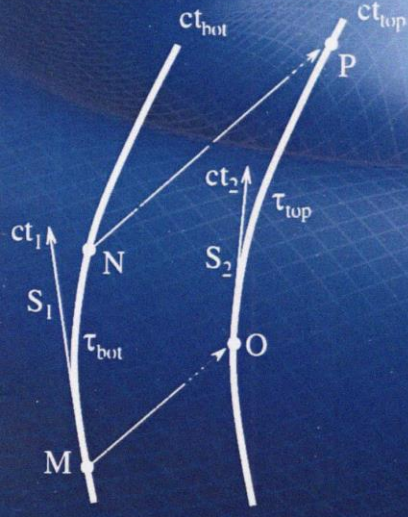
المركز القومى للترجمة



فيسيلين بتكوف

النسبية وطبيعة الزمكان



ترجمة
محمد أحمد فؤاد باشا

2450

النسبية وطبيعة الزمكان

المركز القومى للترجمة
تأسس فى أكتوبر ٢٠٠٦ تحت إشراف: جابر عصفور
مدير المركز: أنور مغيث

- العدد: 2450
- النسبية وطبيعة الزمكان
- فيسيلين بتكوف
- محمد أحمد فؤاد باشا
- الطبعة الأولى 2018

هذه ترجمة كتاب:

Translation from the English language edition:
Relativity and the Nature of Spacetime – 2nd edition
By: Vesselin Petkov

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
Arabic Translation © 2018, National Center for Translation
Springer-Verlag is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

حقوق الترجمة والنشر بالعربية محفوظة للمركز القومى للترجمة
شارع الجبلاية بالأوبرا- الجزيرة- القاهرة. ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤
El Gabalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo.
E-mail: nctegypt@nctegypt.org Tel: 27354524 Fax: 27354554

النسبية وطبيعة الزمكان

تأليف : فيسيلين بتكـــوف

ترجمة : محمد أحمد فؤاد باشا

2018

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشئون الفنية

بتكوف ، فيسيلين .
النسبية وطبيعة الزمكان .
تأليف: فيسيلين بتكوف ، ترجمة: محمد أحمد فؤاد باشا .
ط ١ – القاهرة: المركز القومي للترجمة، ٢٠١٨
٥١٢ ص ، ٢٤ سم
١ – النسبية (نظرية) .
(أ) باشا ، محمد أحمد فؤاد (مترجم)
(ب) العنوان ٥٣٠,١١

رقم الإيداع: ٢٠١٥/ ٣٩٠٠
الترقيم الدولى 9 - 0100 – 92 – 977 – 978
طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

تهدف إصدارات المركز القومي للترجمة إلى تقديم الاتجاهات والمذاهب الفكرية المختلفة للقارئ العربي، وتعريفه بها. والأفكار التي تتضمنها هي اجتهادات أصحابها في ثقافاتهم، ولا تعبر بالضرورة عن رأي المركز.

المحتويات

تصدير المترجم 11

مقدمة الطبعة الثانية 19

مقدمة الطبعة الأولى 21

شكر وتقدير 23

الفصل الأول: تمهيد 25

الجزء الأول من جاليليو إلى منكوفيسكى

الفصل الثانى: عن استحالة الكشف عن الحركة المنتظمة 43

٢,١ رؤية أرسطو عن الحركة 44

٢,٢ كوبرنيكوس وحجج بطليموس ضد حركة الأرض 48

٢,٣ دحض جاليليو لرؤية أرسطو عن الحركة 49

٢,٤ مبدأ النسبية لجاليليو 61

الفصل الثالث: استكشاف المنطق الداخلى لمبدأ النسبية لجاليليو 65

٣,١ عن المعنى الفيزيائى لمبدأ النسبية لجاليليو 67

٣,٢ عن مسلمتي النسبية الخاصة 97

٣,٣ درس من اكتشاف مُتأَخِّر 102

٣,٤ ملخص 103

الفصل الرابع: النسبية في الفضاء الإقليدي وفي الزمكان 105
٤,١ الزمكان 106
٤,٢ استنتاج تحويلات لورنتز 129
٤,٣ المسافة الرباعية الأبعاد وثلاثة أنواع من الطول 140
٤,٤ "التمدد" الصادي في الفضاء الإقليدي وتمدد الزمن في الزمكان .. 150
٤,٥ تقلّص الطول في الفضاء الإقليدي وفي الزمكان 160
٤,٦ مفارقة التوأم في الفضاء الإقليدي وفي الزمكان 170
٤,٧ جمع السرعات 181
٤,٨ المقياس المتري للزمكان 182
٤,٩ عن الزمن الإحدائي والحقيقي 183
٤,١٠ السرعة الرباعية، وكمية التحرك الرباعية، والكتلة النسبوية .. 194
٤,١١ ملخص 202

الجزء الثاني عن طبيعة الزمكان: قضايا مفاهيمية وفلسفية

الفصل الخامس: النسبية وبُعْدِيَّة الكون: الزمكان واقعيّ 207
٥,١ هل طرحت النسبية الخاصة التحدي الفكري الأكبر للجنس البشري؟ 208
٥,٢ النسبية وبُعْدِية الكون 210
٥,٣ تقلّص الطول 227
٥,٤ تمدد الزمن 242
٥,٥ نسبنة الوجود ومفارقة التوأم 247
٥,٦ نسبنة الوجود والمراقبين في النسبية العامة 253
٥,٧ ملخص 257

الفصل السادس: لماذا تُعتَبر قضية طبيعة الزمكان بالغة الأهمية؟ . 259

٦,١ سرعة الضوء في اتجاه واحد واصطلاحية التزامن 262

٦,٢ الصيرورة الزمانية 272

٦,٣ تدفق الزمن والوعي 281

٦,٤ الإرادة الحرة 289

٦,٥ ملخص 293

الجزء الثالث تضمينات واقعية الزمكان للفيزياء

الفصل السابع: انتشار الضوء أطر إسناد لا قصورية 303

٧,١ التسارع مطلق فى النسبية الخاصة والعامة 303

٧,٢ الحاجة لسرعتين متوسطتين للضوء في أُطر إسناد لاقصورية 306

٧,٣ السرعة الإحداثية المتوسطة للضوء 312

٧,٤ السرعة الحقيقية المتوسطة للضوء 319

٧,٥ التأخر الزمنى لشابيرو 332

٧,٦ سبْر سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيا بواسطة تجربة أرضية 335

٧,٧ حول الانزياح الأحمر الثقالي 341

٧,٨ تأثير ساجناك 355

٧,٩ ملخص 360

الفصل الثامن: حساب المجال الكهربي لشحنة في إطار إسناد لاقصوري 361

٨,١ حساب الجهد الكهربي لشحنة في إطار إسناد لاقصوري ... 361

٨,٢ الأصل الفيزيائى المشترك لجهود لينارد – فيتشيرت الكهربية والجهود الكهربية لشحنة 367

٨,٣ حساب المجال الكهربي لشحنة في إطار إسناد لاقصوري .. 378

٨,٤ ملخص 384

الفصل التاسع: القصور الذاتى كمظهر لواقعية الزمكان 385

٩,١ هل القوى القصورية واقعية؟ 387

٩,٢ تتبع القوى القصورية من إجهاد رباعي الأبعاد ناشئ في الأنابيب الكونية المشوهة لأجسام لاقصورية 390

٩,٣ الكتلة الكهرومغناطيسية والقصور الذاتي للإلكترون الكلاسيكي 399

٩,٤ النموذج المعياري والقصور الذاتي 414

٩,٥ ملخص 428

الفصل العاشر: الزمكان وطبيعة الأجسام الكمومية 431

١٠,١ هل الاحتمالات الميكانيكية الكمومية موضوعية 432

١٠,٢ طبيعة الجسم الكمومي وطبيعة الزمكان 435

١٠,٣ ملخص 449

(أ) **حجج ميكانيكية كمومية ضد واقعية الزمكان** 450
(ب) **طبيعة الزمكان وصحة النظريات العلمية** 455
(ب.١) موثوقية المعرفة: استقراء في صورة استنباط خفي 456
(ب.٢) مبدأ التناظر ونمو المعرفة العلمية 464
(ب.٣) هل يمكن تفنيد نظرية علمية مقبولة؟ 469
(ب.٤) هل النظرية العلمية النهائية ممكنة؟ 471
(ب.٥) ملخص 472
(ج) **نظرية الكتلة الكهرومغناطيسية الكلاسيكية والجدل المثار ضدها** 473
(د) **حساب القوة الذاتية** 479
المراجع 484
معجم المصطلحات 497

تصدير المترجم

لقد مرت العلوم المختلفة، بما فيها علم الفيزياء، بمراحل متعاقبة عبر التاريخ، تنسب عادة إلى الحضارات البشرية التى أسستها وطورتها. وعندما أوشك القرن التاسع عشر الميلادى على الرحيل كانت قوانين الفيزياء الكلاسيكية قد نجحت فى تفسير الظواهر الخاصة بعالم المشاهدات العيانية (الماكروكوزم macrocosm)، حيث تعتبر الجسيمات والموجات كيانات مختلفة تماما لا صلة بينها، ويمكن للكميات الفيزيائية التى تصف هذه الكيانات (مثل الطاقة وكمية التحرك) أن تأخذ أى قيمة، كما يمكن أن تؤدى التجارب التى تحقق القوانين الكلاسيكية إلى نفس النتائج إذا ما أجريت تحت نفس الظروف. وقد ساعدت قوانين نيوتن للحركة والثقالة (الجاذبية) على تفسير حركة الأجسام والكواكب، والتنبؤ بنتائج التجارب العملية، وظهر الكون التقليدى كما لو كان "حتميا Deterministic"، وأنه يعمل طبقا لعدد محدود من المبادئ البسيطة، وشعر كثير من العلماء بأن معظم الاكتشافات الضرورية قد تمت بالفعل، وما تبقى من بعض المسائل والقضايا العلمية المستعصية على الحل كانت فى رأيهم بحاجة إلى بعض الوقت لحلها.

لكن بحلول القرن العشرين، أفضت بعض التجارب العملية إلى حقائق جديدة زعزعت "حتمية" القوانين الفيزيائية الكلاسيكية التى اختبرت من قبل، وشملت هذه النتائج اكتشاف الذرة النووية، والأسلوب الذى يتفاعل به الضوء مع الإلكترونات داخل الفلزات، واكتشاف أن سرعة الضوء ثابتة ولا تتغير بتغير سرعة الراصد، ولا نعرف لذلك سببًا، وأن بعض المواد النشطة إشعاعيا بطريقة تلقائية لا نعرف عن سلوكها هذا غير أن ذراتها غير

مستقرة. وأصبح من الضروري حدوث ثورة جذرية في مفاهيمنا حول ما نعرفه من القوانين الفيزيائية من أجل تفسير جميع المشاهدات الجديدة المحيّرة، فاقتحم العلماء عوالم جديدة على مستوى الذرة ونواتها، وعلى مستوى الأجرام السماوية وحشودها، وانبثقت فيزياء حديثة تتعامل مع عالم المتناهيات في الصغر وعالم المتناهيات في الكبر، وتعتمد في معالجتها للقضايا المستجدة منهجا فرضيًا استنباطيًا hypothetico – deductive method يتحدى بطبيعته المخالفة للبداهة كل تفسير منطقي مريح عهدناه وألفنا مفاهيمه في العالم الكلاسيكي. واكتشف بلانك وهيزنبرج وغيرهما نظرية الكم (الكوانتم) quantum theory، كما استحدث آينشتين نظرية النسبية relativity الخاصة والعامة. وقد أدت هذه الفيزياء الحديثة التي ظهرت مع أوائل القرن العشرين إلى إدخال مفاهيم ومصطلحات من قبيل (الاحتمالية والريبة واللايقين) والنسبوية، وغيرها، وانعكست آثارها المباشرة على حياة الناس وفهمهم لطبيعة الكون الذي يعيشون فيه، إلا أن الملاحظة والتجربة والاستقراء تظل دائمًا السمة الرئيسية والمحور الأساسي للبحث العلمي السليم في خصائص المواد وظواهر الكون والحياة.

ويمكن إيجاز خصائص الزمان والمكان في الفيزياء الكلاسيكية والفيزياء الحديثة فيما يلي:

- ما كان يزعج العديد من الفيزيائيين هو أن الثقالة ليس لها سبب ظاهر في نظام نيوتن، وقد أظهرت نظرية النسبية العامة أن الثقالة هي في الواقع نتيجة طبيعية لهندسة الكون، بدلاً من اعتبارها قوة كما تخيل نيوتن.

- الافتراض الأساسي في نظرية آينشتين هو أن الكون يتألف من زمكان (مكان–زمان) رباعي الأبعاد يتشكل من ثلاثة أبعاد مكانية – طول وعرض وارتفاع – وبُعد زماني واحد يمتد من الماضي عبر الحاضر إلى

المستقبل. أما المكان والزمان في رأي نيوتن فهما كينونتان منفصلتان تمامًا توجدان دون علاقة بأي شيء آخر.

• كما يتشكل المكان من عدد لا محدود من النقاط، يتشكل الزمكان من "أحداث" events. والحدث هو نوع معين من الوقائع عند نقطة محددة في مكان ثلاثي الأبعاد وفي لحظة محددة من الزمن. ولا يكفي أن نحدد مكان حدوث حدث ما فقط، فزمان الحدث له نفس أهمية مكانه.

• تنص معادلات المجال لآينشتين Einstein's field equations على أن المادة والطاقة تسببان انحناءً أو تقوسًا في هندسة الزمكان، وهذا الانحناء هو ما يظهر نفسه كثقالة. وفي غياب الكتلة والطاقة يكون الزمكان مسطحًا flat ولا وجود للثقالة فيه. وعندما ننظر إليه على مقياس صغير نسبيًا – محليًا أو موضعيًا local – فإنه يتصرف وكأنه مسطح، وهذا هو نفس التأثير الذي يحكم تصورنا لسطح الأرض الذي نسير عليه، وعندما ننظر إلى الأرض من الفضاء يبدو سطحها منحنيًا بصورة واضحة.

• وكما يمكن تصوير المكان على خريطة ما، يمكن أيضًا تصوير الزمكان على مخطط بياني يحدد الموقع الآني للمراقب، ويشار إلى هذه الآنية nowness=presentism بمصطلح "هنا الآن here-now"، حيث تعني "هنا" موقع المراقب في المكان و"الآن" هي لحظة الحاضر التي يعبر عندها الماضي إلى المستقبل.

• أظهرت التجارب منذ زمن نيوتن أنه لا يمكن التمييز بين الكتلة الثقالية gravitational mass وكتلة القصور الذاتي inertial mass مهما كانت دقة التجارب، ولكن آينشتين أدرك في نظرية النسبية مبدأ التكافؤ equivalence principle ، الذي يقضي بأن أطر الإسناد الثقالية، أو النظم الإحداثية، مكافئة

لأطر الإسناد المتسارعة accelerated frames of reference، وهذا يعني أن السقوط الحر في إطار ثقالي مكافئ للوجود معلقٌ في الفضاء السحيق بعيدًا عن أي كتلة. واستخدم آينشتين تجارب فكرية thought experiments افتراضية تجرى بواسطة الخيال لإظهار بعض جوانب القضايا المتعلقة بالنسبية.

من ناحية أخرى، أتت البراهين الأكثر دقة لتأثيرات النسبية العامة من استخدام تقنيات الرصد بالغة الدقة لقياس الانحراف الذي يسببه انحناء الزمكان بسبب الشمس، ومن قياس الوقت الحقيقي (المضبوط) proper time الذي تستغرقه إشارات ضوئية مرتدة من الكواكب والمسبارات الفضائية. وذلك لإثبات أن انحناء الزمكان لا يحرف فقط الإشعاعات الكهرومغناطيسية، ولكن يؤخرها أيضًا. ويكون زمن التأخير أطول كلما كان مسار الإشارة أقرب إلى الشمس، وينتج هذا التأخير الزمنى عن الفرق بين المسار الفعلى للإشعاع عبر الزمكان المنحنى وبين المسار المستقيم النظرى الذى يسود فى غياب انحناء الزمكان. وكان أروين شابيرو Irwin Shapiro ومعاونوه أول من وصفوا ظاهرة التأخر الزمنى وأجروا المحاولات الأولى لقياسه.

ومن الملاحظ أن قضية الزمكان وهندسته ذات جوانب أنطولوجية تبحث فى كشف طبيعة الوجود اللامادى عموما فى المسائل المترتبة على مفاهيم وتصورات تتعلق بالمادة والطاقة والزمان والمكان والكم والكيف والعلة والقانون وغيرها. ومن هنا تأتى أهمية الكتاب الذى بين أيدينا بعنوان "النسبية وطبيعة الزمكان" للفيزيائى وفيلسوف العلم المعاصر فيسيلين بيتكوف Vesselin Petkov، خاصة وأنه يقدم للقارئ بأسلوب مبسط أهم ما وصل إليه البحث الفيزيائى المعاصر فى نظرية النسبية وهندسة الكون، فضلا عن أنه يهدف إلى تزويد غير المتخصصين بجرعة دسمة من الثقافة العلمية المتقدمة التى تواكب علوم العصر وفلسفاتها. وقد سمح المترجم لنفسه – باعتباره

متخصصا فى الفيزياء – بأن يضيف بعض العبارات والتعليقات بغية المزيد من الإيضاح فى أضيق الحدود، مع تمييز ما أضافه فى المتن بعلامة(*) ووضعه فى الهامش بإتباعه بكلمة [المترجم].

ولا يفوتنى أن أتقدم بخالص الشكر والتقدير للقائمين على المركز القومى للترجمة وحرصهم على إثراء المكتبة العربية بانتقاء الجديد دائما فى مجال الفكر العلمى المعاصر.

د. محمد أحمد فؤاد باشا

إلى جميع الذين يكافحون من أجل فهم هذا الكون الغريب

مقدمة الطبعة الثانية

تحتوي هذه الطبعة الثانية المزيدة من كتاب "النسبية وطبيعة الزمكان" على عدة تغييرات رئيسية وعدد من الإضافات إلى الفصول المختلفة. تم تحويل فصلين (هما الفصلان ٦ و ٧)، ناقشا مجموعتين محددتين من الحجج المعارضة لواقعية الزمكان، إلى ملحقين (أ و ب)، وأضيف فصلان جديدان (هما الفصلان ٦ و ١٠). الفصل ٦، بعنوان "لماذا تُعتَبر قضية طبيعة الزمكان بالغة الأهمية؟"، يفصّل ما جاء في قسم ٥,٦ من الطبعة الأولى، ويتناول بعض الأعمال الحديثة عن طبيعة الزمكان- على سبيل المثال، نموذج الكون الكتْلي المتنامي (أو المتطور)، الذي تم إثارته مؤخرا من قبل عدد من علماء الفيزياء على أنه يبدو كآخر بديل متبق لكون منكوفسكي Minkowski المطلق رباعي الأبعاد (بعد أن أصبح تعارض البعدية الثلاثية أو الآنيّة مع الدليل التجريبي النسبوي حقيقة لا يمكن إنكارها). الفصل ١٠، بعنوان "الزمكان وطبيعة الأجسام الكمومية"، الذي اعتمد على ما استعرضه القسمان ٦,٢ و ٦,٣ من الطبعة الأولى، يستكشف مضامين قضية طبيعة الزمكان في فيزياء الكم، لكي نرى ما إذا كان من الممكن أن توفر بعض التبصر في طبيعة الأجسام الكمومية.

تم إدراج قسمين جديدين، هما، قسمِ ٥,٦ بعنوان "نسبنة الوجود والمراقبين في النسبية العامة" وقسمِ ٧,٦ بعنوان " سبْر سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيا بواسطة تجربة أرضية ". وأضيفت حسابات جديدة إلى قسمين آخَرين، هما قسمِ ٤,٩ بعنوان "عن الزمن الإحداثي والحقيقي" وقسم ٧,٧ بعنوان "حول الانزياح الأحمر الثقالي (الجاذبي)". في نهاية

قسم ٥,٥ تم إدراج تصور جديد لمفارقة التوأم ينطوي على توأم ثالث يتسارع بمقدار يساوي ضعف تسارع التوأم الثاني بعنوان "نسبنة الوجود ومفارقة التوأم". تم إدخال شروحات إضافية في عدة أقسام أخرى، تشمل تفسيرات (في قسم ٥,٣) لعدم تسبب تقلّص الطول في قطع الخيط الواصل بين سفينتي فضاء متسارعتين في التجربة الفكرية القديمة المتناقضة ظاهريًا والتي أثارها جون بيل John Bell في السبعينيات أثناء مناظرة بينه وبين الزملاء في سيرن CERN. أُدرج اثنا عشر شكلاً جديدًا (أشكال ٥,٥ ، ٥,٦ ، ٥,٧ ، ٥,٨ ، ٥,١٢، ٥,١٣، ٦,١، ٦,٢، ٦,٣، ٧,٤، ٧,٥، ٧,٦) واستُبدلت ثلاثة أشكال بأخرى محسنة (أشكال ٤,٣، ٤,٢٨، ٧,٦). وأخيرا، أضيف ٤٧ مرجعًا في هذه الطبعة.

أنا ممتن للعدد الكبير من الزملاء والطلاب، الذين يصعب ذكرهم جميعًا، على تعليقاتهم حول مختلف القضايا التي نوقشت في الطبعة الأولى من الكتاب. ولكنني أود أن أخص بالشكر الدكتور كارلوس س. ليفا Carlos S. Leiva (جامعة تاراباكا، أريكا، شيلي) الذي سجل رأيه عن الطبعة الأولى في Amazon.com: "أنا متأكد من أن طلابي قادرون، ليس فقط على إجراء حسابات، ولكن أيضًا على معرفة ما يقومون بحسابه". لقد كنت أستخدم بالفعل نفس تلك الكلمات في أعماق عقلي أثناء تدريس نظرية النسبية لطلاب الفيزياء، ولكن التركيز على تلك النقطة المهمة أُغفل بطريقة ما في الطبعة الأولى. وتم استدراكه الآن في هذه الطبعة.

فيسيلين بيتكوف

مونتريال

٩ فبراير ٢٠٠٩

مقدمة للطبعة الأولى

الكتب النموذجية عن النسبية لا تتناول في العادة مسائل المعنى الفيزيائي للتأثيرات النسبوية وطبيعة الزمكان. يُعنى هذا الكتاب تحديدًا بمثل تلك المسائل المفاهيمية. ويتم تحليل جميع النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة عن طريق السؤال صراحة عما إذا كانت الأجسام الفيزيائية المتعلقة بتلك التأثيرات ثلاثية الأبعاد أم رباعية الأبعاد؛ وهو ما يعادل التساؤل عما إذا كانت هذه الأجسام موجودة فقط عند اللحظة الراهنة من أوقاتها، كم هو متوقع من إحساسنا الفطري، أم في كل اللحظات من تاريخها. جوابا على سؤال ما إذا كانت بُعْدِية الأجسام الفيزيائية سوف تحل القضية المتعلقة بطبيعة الزمكان – سواء كان الزمكان هو مجرد فضاء رياضياتي (مثل فضاء ملون سباعي الأبعاد، على سبيل المثال)، أو يمثِّل كونًا واقعيا رباعي الأبعاد.

هذا الكتاب مخصص للفيزيائيين وفلاسفة العلم، والفلاسفة، وطلاب الفيزياء والفلسفة، ولكل من يهتم بما تخبرنا به النسبية الخاصة عن الكون.

شكر وتقدير

أود أن أعرب عن امتناني لكل الذين أسهموا في ظهور هذا الكتاب. لقد شارك كثيرون في مناقشات القضايا التي تمت تغطيتها هنا ويكاد يتعذر بالفعل ذكرهم جميعا. لهذا أود فقط أن أشكرهم على تعليقاتهم البناءة، آملاً أن تكون مناقشاتنا قد جعلتنا نقترب قليلاً من فهمنا لذلك الكون الجميل، بل الغريب.

أشعر بأنه يجب على أن أبدأ قائمة الشكر القصيرة بتوجيه الشكر لسبرينجر Springer، ودكتور أنجيلا لاهي Angela Lahee للبدء في نشر "مجموعة المشارف". أظن أن ظهور تلك السلسلة جاء في وقت أكثر من مناسب؛ لأن معالم التطورات الجديدة في المجالات العلمية المختلفة أصبحت بمنأى عن أنظار العلماء. أود أيضا أن أشكر ستيفن ليلى Stephen Lyle على تحريره الفنى الرائع للنص المخطوط.

أنا مدين كثيرا لمعلمي وصديقي أناستاس أناستاسوف Anastas Anastassov من جامعة صوفيا. إن محاضراته الممتازة عن النسبية العامة في الثمانينيات، ومناقشاتنا التى لا تنتهى، أعدت الأرضية للأفكار المطورة في هذا الكتاب. وأتوجه بشكري للأستاذ تزفيتان بونكيف Prof. Tzvetan Bonchev (عميد كلية العلوم بجامعة صوفيا في ذلك الوقت، ورئيس قسم الفيزياء الذرية) والأستاذ إنفانكا أبوستولوفا Ivanka Apostolova (رئيس قسم الفلسفة بجامعة صوفيا في ذلك الوقت)، فتأثيرهما يصعب تقييمه.

وأنا ممتن لزملائي من قسم فلسفة العلم بمعهد البحوث الفلسفية بالأكاديمية البلغارية للعلوم، الذين ناقشت معهم العديد من موضوعات هذا الكتاب فى أواخر الثمانينيات.

لقد تمت تغطية عدد من القضايا التي فحصت في الكتاب في مقررات مختلفة قمت بتدريسها – في دروس فلسفة العلوم في جامعة صوفيا في الثمانينيات وبعد ذلك في دروس الفيزياء وفلسفة العلوم في جامعة كونكورديا. وأعرب عن امتناني لجميع الطلاب الذين شاركوا في المناقشات. كما أنني استفدت من الملاحظات القيمة التي أبداها الزملاء والطلاب في جامعة كونكورديا، وجامعة ماك جيل وجامعة مونتريال، والذين شهدوا سلسلة المحاضرات التي قمت بإلقائها في ندوة أسبوعية عن النسبية العامة في خريف عام ١٩٩٤، وعقدت في جامعة كونكورديا. وأود أن أعرب عن خالص شكري لجميع الحكام المجهولين الذين قدَّموا توصيات وتعليقات بناءة بشأن مختلف القضايا التي تم تضمينها الآن في هذا الكتاب. إن معظم النتائج المعروضة هنا سبق عرضها أيضًا في العديد من المؤتمرات الدولية وفي ندوتين داخل جامعة مونتريال – عن الأسئلة المفتوحة في الفيزياء وعن تاريخ وفلسفة العلم. وأنا ممتن حقا للزملاء والطلاب الذين شاركوا في المناقشات.

أخيرا، أود أن أعرب عن امتناني العميق لزوجتي سفيتوسلافا Svetoslava وابننا فسيلين Vesselin (الابن) لتفهمهما وتشجيعهما، ولدعمهما التام غير المشروط. لم يكن من الممكن الانتهاء من هذا الكتاب لولا حبهما لي وثقتهما في بغير حدود.

فيسيلين بيتكوف

مونتريال

١٢ أكتوبر ٢٠٠٤

الفصل الأول

تمهيد

هذا الكتاب ليس كتابًا نموذجيا عن نظرية النسبية. فهو يوجه التركيز إلى التحليلات المفاهيمية التى تقع خارج نطاق معظم كتب الفيزياء حول هذا الموضوع. ودائمًا ما تشير مثل تلك التحليلات المفاهيمية إلى وجود أجسام فيزيائية مشاركة في التأثيرات النسبوية، فى لحظات الماضى والحاضر من تواريخها. مع الأسف، هناك من علماء الفيزياء من يعتقد، بل يجادل أحيانًا، في أن مثل تلك الأسئلة عن الوجود ليست أسئلة فيزيائية لأن الفيزياء، من وجهة نظرهم، لا تتعامل مع كينونة الأجسام والظواهر التى تصفها. أظن أن تلك الرؤية تخلط بين *النظرية الفيزيائية* وبين تعبيرها الرياضى. تعنى الفيزياء بدراسة الكون الموجود وأشك في أن عالِم الفيزياء، عندما يتعرض لقضية الوجود، قد يزعم أن الفيزياء لا تخبرنا أى شيء عن كينونة الإلكترونات، مثلاً.

وهذا هو السبب في أن أحد أهم أهداف الكتاب هو توضيح الدور الحاسم للتحليلات المفاهيمية في الوصول إلى نتائج فيزيائية جديدة، وإحراز التقدم في الفيزياء الأساسية، وتحصيل فهم أعمق للنظريات الفيزيائية. ويعزى هذا التأكيد الخاص إلى أن تلك التحليلات ينظر إليها بواسطة العديد من

الفيزيائيين على أنها طراز قديم حتى إنها تنتمي إلى علم الفلسفة.(*) إن تاريخ التقدم الأساسي في علم الفيزياء، على الرغم من ذلك، يظهر بشكل مقنع أن التحليلات المفاهيمية تشكل الفيزياء في أفضل حالاتها.

بدأت فكرة هذا الكتاب تلوح لي منذ سنوات عندما كنت أناضل من أجل فهم المعنى الفيزيائي لنتائج النسبية الخاصة والعامة. في ذلك الوقت فشلت في العثور على أي كتب فيزيائية عن النسبية تتناول الأسئلة التي تبدو بالنسبة لي واضحة جدًا. ها هي ثلاثة أمثلة لهذه الأسئلة:

• لقد ذُكر في جميع كتب النسبية الخاصة أن الحركة المنتظمة نسبية، ولكن ظهر أنه لا حاجة لتوضيح *السبب* في أن الحركة المنتظمة المطلقة لا وجود لها. إن الإجابة على هذا السؤال تكون حاسمة من أجل فهم حقيقي أصيل للنسبية الخاصة على نحو ما توضحه المفارقة الظاهرية التالية. يخبرنا إحساسنا الفطري أنه إذا تحرك جسم في الفضاء فإنه يتحرك بالنسبة إلى الفضاء. بالفعل إذا ما نظرنا بعين الاعتبار إلى أمثلة مختلفة لشيء يتحرك داخل شيء آخر، فلن تبدو العبارتان "يتحرك في" و"يتحرك بالنسبة إلى" متكافئتين. وعلى الرغم من ذلك، طبقًا لنظرية النسبية، يكون مثل هذا الاستنتاج خاطئًا؛ لأن مضمونه يعتمد على فكرة الحركة المطلقة. وبذلك فإنه لا يزال

(*) في رأيي، عدم النظر إلى التحليلات المفاهيمية على أنها فيزياء هو من الممارسات الخطرة؛ حيث إن مجرد إجراء الحسابات لا يمكن أن يساعد في الحالات التي لا تتعلق بتطبيقات محددة للنظرية. مثلاً، لا يمكن للحسابات أن تساعدنا على تحديد ما إذا كان هناك تناقض واقعي أو ظاهري بين ميكانيكا الكم والنسبية، وما الذي قد يسبب التناقض (الظاهري أو الواقعي). وإذا استبعدت التحليلات النظرية على اعتبار أنها لا تنتمي إلى الفيزياء، فالشيء الوحيد الذي سيبقى هو الحدس. ولكن الحدس ليس دائما المستشار الأفضل في الفيزياء الأساسية.

القول سليمًا في النسبية بأن جسمًا ما يتحرك في الفضاء وليس *بالنسبة* إلى الفضاء. ومن هنا على وجه التحديد يجب توجيه السؤال المتعلق بعدم وجود الحركة المنتظمة المطلقة حتى يتسنى شرح العمق السحيق لما يكمن وراء الفرق الذي يبدو بسيطًا بين العبارتين.

• قضية مهمة أخرى تحتاج إلى اهتمام خاص وهي المعنى الفيزيائي لنسبية التزامن(*)، وتأتي منطقيًا بعد السؤال عن الحركة المطلقة، ويمكن معالجتها بطرق مختلفة على حسب ما إذا كانت تُناقَش في درس للفيزياء أم لفلسفة الفيزياء. في درس للفيزياء عن النسبية، تكون المسألة المفضلة لدي لكي أبدأ تحليل المعنى الفيزيائي لنسبية التزامن هي التالية:

يتحرك إطار إسناد قصوري 'S بالنسبة إلى إطار إسناد قصوري آخر S في الاتجاه الموجب للمحور x للإطار S. ضبطت الساعتان في S و'S علي اللحظة t=t'=0 عندما كانت نقطتا أصل المحاور O و'O للإطارين متطابقتين. انبعثت عند هذه اللحظة موجة ضوئية من النقطة $O \equiv O'$. لوحظ في S بعد مرور زمن t أن الموجة الضوئية كروية بنصف قطر r=ct وتوصف بالمعادلة $r^2=x^2+y^2+z^2$، مما يعني أن مركز الكرة الضوئية يقع عند O كما هو معين في S. أوجد شكل جبهة الموجة الضوئية في 'S عند زمن 't. أهي أيضًا كرة مركزها عند 'O؟ إذا كانت كذلك، هل يؤدي هذا إلى حدوث مفارقة؟ وإذا لم تكن كذلك، هل يؤدي هذا إلى حدوث تناقض مع مبدأ النسبية؟

(*) التزامن أو الاقتران الزمني simultaneity هو حالة اقتران حدوث حادثتين أو أكثر في نفس اللحظة. وفي الفيزياء الكلاسيكية، إذا رأى مراقب ما حادثتين متزامنتين فإنهما تظهران متزامنتين أيضًا لأي مراقب آخر في حالة حركة نسبية منتظمة، أما في نظرية النسبية فإن ذلك لا يكون صحيحًا [المترجم]

يتطلب مبدأ النسبية أن تبدو جميع الظواهر الفيزيائية متشابهة من داخل جميع أُطر الإسناد القصورية. ولهذا يجب أن يكتشف مراقب في 'S أن جبهة الموجة للإشارة الضوئية المنتشرة هي أيضًا كرة مركزها عند 'O. يتأكد هذا الاستنتاج بواسطة تحويلات لورنتز(*). ولكن خبرتنا اليومية تخبرنا عن ضرورة وجود شيء خاطئ تماما هنا – لا يمكن أن يوجد مركز نفس الموجة الضوئية في مكانين مختلفين (عند O و'O اللذين قد يبعدان عن بعضهما آلاف الكيلومترات). التفسير النموذجي لهذه المفارقة الواضحة هو ما يلي: تشكل جبهة الموجة للكرة الضوئية المنتشرة مجموعة من الأحداث المتزامنة، وحيث إن التزامن نسبي، وذلك طبقًا لنظرية النسبية، فإن المراقبين في S و'S لديهما مجموعتان مختلفتان من الأحداث المتزامنة، ومن ثم كرتان ضوئيتان مختلفتان. إن هذا تفسير سليم. ولكن هل أنت راضٍ عنه؟ أشك في ذلك. هذا التفسير غير مكتمل من الناحية المفاهيمية لأنه فقط يُحول المفارقة من الحالة المعينة من انتشار الضوء إلى نسبية التزامن ذاتها. والشيء الذي يبقى بلا تفسير هو لماذا يكون لدى المراقبَين في S و'S، اللذين يتحركان بالنسبة لبعضهما، مجموعتان مختلفتان من الأحداث المتزامنة، ومن ثم كرتان ضوئيتان مختلفتان (إحداهما مركزها عند O والأخرى عند 'O) مع العلم بأن كلتا الكرتين تنبعان من إشارة ضوئية واحدة. إذا فُسر *المعنى الفيزيائي* لنسبية التزامن من الناحية المفاهيمية فسوف يتم عندئذ أيضًا تفسير هذه المفارقة الواضحة.

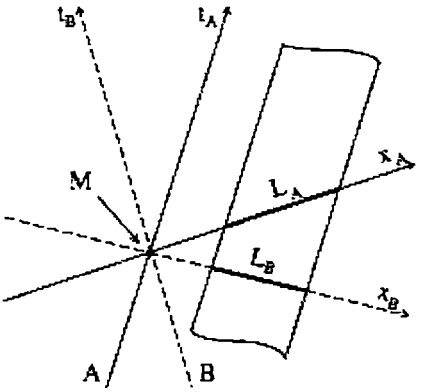
(*) تحويلات لورنتز Lorentz transformations: تنسب إلى الفيزيائي الهولندي هيندريك أنطون لورنتز (١٨٥٣ – ١٩٢٨) الذي اقترح مجموعة معادلات تحويل إحداثيات موضع وحركة من إطار إسناد معين إلى إطار إسناد آخر متحرك بالنسبة إلى الأول. وقد حلت هذه التحويلات محل "تحويلات جاليليو" المستخدمة في الميكانيكا النيوتونية واستخدمت في الميكانيكا النسبوية [المترجم]

• السؤالان السابقان، بالإضافة إلى السؤال عن المعنى الفيزيائي لتقلّص الطول، وتمدد الزمن، ومفارقة التوأم، تؤدي جميعها إلى نفس القضية الرئيسية – كيف يجب أن يُفهم الزمكان. بعد قرن تقريبا من دمج هيرمان مينكوفسكي للمكان والزمان في كيان رباعي الأبعاد لا يمكن فصله– يسمى الآن بزمكان مينكوفسكي(*)– مازال سؤال "ما طبيعة الزمكان؟" مفتوحًا. من وجهة نظري، يجب طرح هذا السؤال، ليس فقط في الأبحاث والكتب المعنية بفلسفة الزمكان، ولكن في أي كتاب أو منهج فيزياء جامعي عن النسبية. حتى الآن لم يتم هذا، ربما لأنه يبدو أن معظم علماء الفيزياء يعتقدون أن مهمتهم هي صنع التنبؤات التي يمكن اختبارها تجريبيا وأنهم لا يحتاجون إلى الانشغال بأسئلة مفاهيمية من قبيل: هل زمكان مينكوفسكي ما هو إلا فضاء رياضياتي رباعي الأبعاد يعبر عن كون ثلاثي الأبعاد دائم التطور مع الزمن أم هو نموذج رياضياتي لكون رباعي الأبعاد يعطَى فيه الزمن كليًا كبعد رابع؟ على الرغم من ذلك، لا يمكن تجنب تلك الأسئلة المفاهيمية، حيث إن الهدف الفكري النهائي لجميع العلوم، بما في ذلك الفيزياء، هو فهم الكون الذي نعيش فيه.

في الواقع، وحتى بغض النظر عن فضول فكري محض، يحتاج الفيزيائيون أنفسهم إلى معالجة القضايا التي تتناول تفسير نظرية النسبية إذا كانوا يريدون أن يقدموا بعض *التفسير* للتأثيرات النسبوية، بحيث يمكن أن يجعل وصفهم الرياضياتي أكثر شفافية. خذ على سبيل المثال تقلصًا للطول كما هو مبين في الشكل أدناه. يتحرك مراقبان قصوريان A و B حركة نسبية

(*) في هندسة مينكوفسكي H. Minkowski (١٨٦٤ – ١٩٠٩) تُعرّف حادثة ما بنقطة كونية world point في متصل زمكاني رباعي الأبعاد يكون الزمان والمكان فيه مجدولين بحيث لا يستطيع مراقبان في حالة حركة نسبية أن يتفقا بشأن الاقتران الزمني لأحداث بعيدة. وقد بنى اينشتين هندسته الزمكانية هذه على هذا الأساس. [المترجم]

ويمثلان بخطيهما الكونيين (أي الخطان الزمنيان لحياتهما الكـاملتين)[*] قبـع عصا مترية في ثبات في إطار إسناد A وتمثل بأنبوبهـا الكـوني (تاريخهـا الزمني الكامل) في مخطط الزمكان المبين في الشكل.



يقاس طول العصا المترية بواسطة A وB عند الحدث M عندما يتقابـل المراقبان، أي عند اللحظة التي يقومان فيها بضبط ساعتيهما علـى صـفر: $t^A=t^B=0$. بما أن أي قياس للطول يتطلب قياس كلتا نهايتي العصا المترية في نفس الوقت، وحيث إن لكل من A وB مجموعـة مختلفـة مـن الأحـداث المتزامنة، فإنه يترتب على ذلك، مع قياس *نفس* العصا المترية، أن يقيس كل من A وB عصَويْن متريتين مختلفتين *ثلاثيتي الأبعاد* (حاول أن تتـذكر كـم كتابًا عن النسبية يذكر تلك الحقيقة التي لا يمكن إنكارهـا)، بمعنـى أنهمـا يقيسان مقطعين مختلفين ثلاثيي الأبعاد لأنبوب العصا الكـوني. وحيـث إن المحورين x لكل من A وB يقطعان الأنبوب الكوني بزاويتين مختلفتين، فـإن

(*) الخط الكوني world line لجسيم ما يمثل تاريخ هذا الجسيم في الزمكان، بمعنى أنـه المسار الذي يصل بين حوادث في تاريخ الجسيم. ويكون هذا الخط مستقيمًا إذا كـان الجسيم متحركا بانتظام، بينما يكون منحنيًا (مقوسًا) عندما يكون الجسيم متسارعًا، أي متحركا بعجلة [المترجم]

طولي المقطعين L_A وL_B مختلفان، وهذا ما يفسر السبب في أن A و B يقيسان طولين مختلفين للعصا المترية. يتم الحصول على العلاقة الفعلية بين الطولين باستخدام تحويلات لورنتز، التي تبين أن $L_B<L_A$.

هنا لا يستطيع علماء الفيزياء تجنب السؤال المفاهيمي عن طبيعة الأنبوب الكوني للعصا المترية: هل الأنبوب الكوني ليس أكثر من مجرد تمثيل بياني لتقلّص الطول أم هو جسم واقعي رباعي الأبعاد يحتوي على التاريخ الزمني الكامل للعصا المترية ثلاثية الأبعاد؟ يتضح من الرسم التخطيطي للزمكان أنه، إذا كنا نرفض واقعية الأنبوب الكوني للعصا المترية، فلا يمكن حينئذ أن يكون لدى A و B مقطعان مختلفان، لأن عصا A المترية هي فقط التي قد تكون موجودة بالطول L_A. هذا يعني أن نفس العصا المترية *بنفس* الطول L_A ستكون موجودة في B أيضًا، ولن يكون من الممكن حدوث تقلص للطول. لذلك فإن جوهر الوجود لتقلّص الطول النسبوي يعني واقعية الأنبوب الكوني للعصا المترية. وهذا بدوره يتضمن واقعية(*) الزمكان (كون مينكوفسكي)، ما دامت الأجسام رباعية الأبعاد موجودة في كون رباعي الأبعاد.

معظم الكتب حول نظرية النسبية لا تستخدم رسومًا تخطيطية للزمكان، وبالأخص عند مناقشة التأثيرات النسبوية الكينماتيكية، ولا تواجه الحاجة الملحة لمعالجة قضية طبيعة زمكان مينكوفسكي. عادة لا يُتعمق في شرح هذه التأثيرات إلى أبعد من مجرد الحصول عليها باستخدام تحويلات لورنتز. من وجهة نظري، مثل هذا النهج غير مُرضٍ لثلاثة أسباب: أهمها، أن الرسوم التخطيطية للزمكان تساعد الطلبة على فهم المعنى الفيزيائي للتأثيرات النسبوية، مثال ذلك، المعنى الفيزيائي لتقلّص الطول- أثناء قياس نفس العصا

(*) في هذا الكتاب، عندما أتحدث عن واقع الزمكان، أعني بذلك أن الواقع هو كون رباعي الأبعاد، وليس مجرد صورة أو تسمية دالة على الكينونة أو الوجود.

المترية، يقيس مراقبان يتحركان حركة نسبية عصوين مختلفتين ثلاثيي الأبعاد، مما يوضح أن الأنبوب الكوني للعصا المترية هو جسم واقعي رباعي الأبعاد. بمثل هذه الطريقة *سوف يعرف الطلبة ما يقومون بحسابه*. ثانيًا، الفيزياء أكثر بكثير من صورتها الرياضياتية(*)، ولذلك يجب فعل كل شيء لإيجاد تفسير فيزيائي للنتائج التي تم الحصول عليها من خلال تحويلات لورنتز. ثالثًا، إذا لم يبذل علماء الفيزياء وبالأخص علماء النسبية أنفسهم، مجهودات لإلقاء الضوء على المعنى الفيزيائي للتأثيرات النسبوية، فإن تفسيرات مختلفة سوف تبدأ في الظهور وتكون فى معظم الحالات غير متوافقة مع نظرية النسبية نفسها.

أحد الأسباب الرئيسية لتأليف هذا الكتاب هو تناول قضية المعنى الفيزيائي للتأثيرات النسبوية وطبيعة الزمكان عن طريق تحليل ما تخبرنا به الصورية الرياضياتية للنسبية. وبشكل أكثر تحديدا يتم ذلك عن طريق:

- إجراء تحليل لفكرة الحركة المطلقة بدءًا من رؤية أرسطو للحركة
- تناول بشكل صريح لمسألة وجود وبُعْدِيَّة الأجسام الفيزيائية (المساطر، والساعات، والتوائم، وغيرها) التي تشملها التأثيرات النسبوية.

الجزء الأول بعنوان "من جاليليو إلى منكوفيسكى" يبدأ بفصل عن فكرة الحركة المطلقة، وكيف تم وصولها إلى نهايتها المنطقية عن طريق تفنيد جاليليو لوجهة نظر أرسطو حول الحركة. الفصل الثالث مخصص لاستكشاف المنطق الداخلى لمبدأ النسبية لجاليليو. سوف أناقش فكرة أن نظرية النسبية الخاصة، وأكثر تحديدًا صياغتها رباعية الأبعاد التي قدمها مينكوفسكي، متضمنة *منطقيًا* داخل مبدأ النسبية لجاليليو (مع افتراض إضافي

(*) الصورية formalism هي القول بأن حقائق العلوم ليست إلا مجرد مواضعات متفق عليها، وتلك هي الصوريّة المحضة وتكاد تتحقق كاملة في الرياضيات. راجع المعجم الفلسفي، مجمع اللغة العربية، القاهرة ١٩٨٣م. [المترجم]

وحيد – أن سرعة الضوء محدودة، وهو ما تم تحديده تجريبيا في عهد جاليليو). إحدى نتائج هذا الفصل المهمة ستكون الاستنتاج الغير بسيط الذي يقضي بأن عدم وجود حركة منتظمة مطلقة يقتضي ضمناً أن يكون الكون رباعي الأبعاد (أو، على نحو مكافئ، إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد، فلابد من وجود الحركة المنتظمة المطلقة لأن كوناً وحيدًا ثلاثي الأبعاد يقتضي ضمناً أن يكون "التحرك في الفضاء"، متكافئًا مع " التحرك بالنسبة للفضاء"، كما سنرى في الفصل الثالث). يؤدي المزيد من الاستكشاف للنتائج المترتبة على مبدأ النسبية لجاليليو إلى جميع التأثيرات الكينماتيكية النسبوية المستنتجة في الفصل الرابع. توضح هذه الاستنتاجات أن التأثيرات النسبوية ما هي إلا مجرد تجليات لرباعية أبعاد الكون الذي تكون هندسته إقليدية زائفة، حيث إن هذه التأثيرات لها نظائر مباشرة في الفضاء الإقليدي العادي ثلاثي الأبعاد. أحد أهداف الجزء الأول هو إظهار أنه كان يمكن في وقت سابق صياغة النسبية الخاصة واقعيا بطريقة ذات مغزى.

الجزء الثاني بعنوان "*عن طبيعة الزمكان– قضايا مفاهيمية وفلسفية*" هو أكثر الأجزاء الثلاثة من الكتاب إثارة للجدل. ولكن كان لابد من كتابته حيث إن القضايا التي أثارتها نظرية النسبية قد تحدت رؤيتنا الكلية عن الكون بشكل لم يسبق له مثيل. لم يحدث من قبل أن نظرية علمية دعت إلى تلك المراجعة الجذرية للمفاهيم التي.ننظر لها حتى اليوم على أنها بديهية وبيّنة بذاتها، مثل:

- الأجسام الفيزيائية والكون موجودات ثلاثية الأبعاد.
- التغيير موضوعي.
- انسياب الزمن موضوعي.
- الإرادة الحرة موجودة.

لقد طرحت النسبية الخاصة – فيما أرى – ما قد يكون أعظم تحدٍ فكري واجهته البشرية في أي وقت مضى. وإن أفضل طريقة لمواجهة التحدي في هذه الحالة هي التعامل مباشرة مع جوهره – السؤال عن طبيعة الزمكان– لأن هذا السؤال قد فاق منطقيًا في أهميته الأسئلة الأخرى عن التغيير، وانسياب الزمن، والإرادة الحرة. كما سنرى في الفصل السادس، تعتمد هذه القضايا بصورة فاصلة على تحديد بُعْدِيّة الكون، وهو ما يوضح أنها فعلاً أقل أهمية من قضية طبيعة الزمكان.

لهذا يبحث الفصل الأول من الجزء الثاني (الفصل الخامس من الكتاب) قضية طبيعة زمكان مينكوفسكي ويوضح أن نظرية النسبية الخاصة وحدها والدلائل التجريبية التي تؤكد تنبؤاتها هي القادرة على حل هذه القضية. يأتي هذا الجدل من التحليل الذي تم إجراؤه في الفصل الذي يبين أن النسبية الخاصة صالحة فقط في كون رباعي الأبعاد ممثل بواسطة زمكان مينكوفسكي. من ناحية أخرى، إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد، فإن أيا من التأثيرات النسبوية الكينماتيكية لن يكون ممكنا، بشرط أن يكون وجود الأجسام الفيزيائية المتَضمَّنة في التأثيرات النسبوية وجودًا مطلقًا على سبيل الفرض (أي غير معتمد على الإطار). السبيل الوحيد للحفاظ على بُعْدِيَّة الكون الثلاثية يكون عن طريق نسبنة الوجود. ولكن، حتى هذه الخطوة المتطرفة تتناقض مع الأدلة النسبوية التجريبية كما هو مبين في الفصل الخامس وفي القسم ٦,١.

التضمينات العميقة للنسبية (وما تتطلبه في أن يكون الكون رباعي الأبعاد) لعدد من القضايا الأساسية مثل اصطلاحية التزامن، والصيرورة الزمانية ، وانسياب الزمن، والإرادة الحرة، وحتى الوعي، تمت مناقشتها في الفصل السادس. اتضح أنه، في كون مينكوفسكي رباعي الأبعاد:

• يكون تعريف التزامن بالضرورة اصطلاحيًا، وهو ما يفسر المعنى العميق للحلقة المفرغة – لتحديد ما إذا كان الحدثان متزامنين نحتاج إلى معرفة سرعة الضوء في اتجاه واحد بينهما، ولكن لتحديد سرعة الضوء في اتجاه واحد بينهما ينبغي أن يكون الحدثان متزامنين،

• لا توجد صيرورة موضوعية ولا انسياب زمني موضوعي.

• لا توجد إرادة جرة بمفهومها العام.

• هناك حاجة إلى مفهوم الوعي (تم تعريفه ضمنيًا بواسطة هيرمان فايل Hermann Weyl [١] على أنه كيان يجعلنا على دراية بأنفسنا وبالكون فقط عند لحظة "الآن" من زمننا الحقيقي) للتوفيق بين النتيجة الرئيسية الناجمة عن النسبية الخاصة والتي تقضي بأن الواقع الخارجي هو كون رباعي الأبعاد أبدي الوجود، وبين الحقيقة المأخوذة من خبرتنا بأن إدراكنا لأنفسنا وللكون يكون فقط عند اللحظة الحاضرة.

هذه هي الاستنتاجات التي تشكل التحدي الفكري المذكور أعلاه. الطريقة الأكثر إغراء للخروج من ذلك هو أن يُعلن أنها منافية للعقل، أو أنها خاطئة من غير شك. هذا رائع، إذا كان ذلك الإعلان مدعومًا بحجج توضح أسباب خطأ هذه الاستنتاجات. إحدى الطرق لتجنب مواجهة التحدي هي أن نتفق مع الرأي القائل بأننا يجب أن نقبل بنظرية النسبية، ولكن ينبغي ألا نصدر آراء ميتافيزيقية بشأن طبيعة الزمكان. لكن مثل هذا الرأي يتجاهل تماما حقيقة أن تحليل التأكيد *التجريبي* لنتائج النسبية الخاصة يبين بوضوح أن التحدي موجود.

يوجد مدخلان آخران يحاولان تجنب التحدي الذي تطرحه النسبية الخاصة.هذان المدخلان يرميان إلى إظهار أننا يجب ألا نتكلف العناء حول

الاستنتاجات الميتافيزيقية المستخلصة من النسبية الخاصة، وذلك لسببين. وفقا للمدخل الأول، حقيقة أن النسبية تصف الكون بأنه رباعي الأبعاد وحتمي، لا يجب أن تؤخذ على أنها الحقيقة الكاملة لأن ميكانيكا الكم، والجاذبية الكمومية، وغيرهما من النظريات الفيزيائية الحديثة تخبرنا بروايات مختلفة. إذا نحينا جانبا حقيقة أن الجاذبية الكمومية وبعض النظريات الفيزيائية الحديثة لا تعد نظريات مقبولة بعد، فإن الملحق A سوف يستفيد من نتائج الفصل الخامس التي تقضي بأن الأدلة التجريبية المؤكدة لنتائج النسبية الخاصة هي التي تتعارض مع الرأي المناصر للبُعْدِيَّة الثلاثية . حتمًا كان سيوجد رأي آخر إذا كانت الأدلة التجريبية المؤكدة لتنبؤات ميكانيكا الكم مناقضة لرأي أنصار البُعْدِيَّة الرباعية. لكن هذا ليس هو الحال. سوف يقدم الملحق A حجتين توضحان أن ميكانيكا الكم ليس لديها ما تخبرنا به عن طبيعة الزمكان.

يتعامل الملحق ب مع المدخل الثاني الذي لا يمكن على أساسه أن تقول نظرية النسبية الخاصة لنا أي شيء محدد عن الكون الخارجي، لأنها، مثل أي نظرية أخرى، يمكن دحضها ذات يوم. سوف نرى أن هذه المحاولة اليائسة لتجنب التحدي الذي تشكله النسبية قد فشلت أيضا. مرة أخرى، هذه الحجة تتجاهل تماما حقيقة أن *الأدلة التجريبية* المؤكدة لتنبؤات النسبية الخاصة هي التي تتناقض مع الرؤية ثلاثية البُعْدِيَّة. وبما أنه لا يمكن دحض الدليل التجريبي، فإن أي هجوم على منظور البُعْدِيَّة الرباعية ينبغي أن يتحدى الادعاء بأن التجربة ذاتها تتناقض مع الرأي المقبول للبُعْدِيَّة الثلاثية . يقال إنه لايمكن أبدًا دحض نظرية علمية في نطاق قابليتها للتطبيق الذي تم فيه التأكد من توقعاتها تجريبيا.

الغرض الرئيسي من الجزء الثاني هو التوضيح المقنع لواقعية التحدي لنظرتنا الكونية الناجمة عن النسبية الخاصة – بأن الكون رباعي الأبعاد. ذاك هو السبب فقط في أنه من الإنصاف مواجهته الآن بدلا من تركه للأجيال القادمة.

الجزء الثالث بعنوان "تضمينات واقعية الزمكان في الفيزياء" يستكشف المزيد من النتائج المترتبة على البُعْدِية الرباعية للكون في الفيزياء نفسها. يبدأ الفصل السابع بإظهار أن النسبية قد حلت الجدل حول التسارع – هل هو مطلق كما اعتقد نيوتن أم هو نسبي كما أصر كل من لايبنتز وماخ. يمَثل جسم يتحرك بالقصور الذاتي (بدون تسارع) في زمكان مينكوفسكي بأنبوب كوني مستقيم؛ إذا كان الجسم متسارعًا، فسيكون أنبوبه الكوني منحنيًا. وبذلك تبين النسبية الخاصة بوضوح أن التسارع مطلق – هناك فرق مطلق بين أنابيب الكون المستقيمة والمنحنية (وأنابيب الكون تلك، كما نوقشت في هذا الكتاب، ليست مجرد تمثيل بياني مناسب، وإنما هي أجسام واقعية رباعية الأبعاد).

الوضع في النسبية العامة مماثل. فالمُناظر لأنبوب كوني مستقيم داخل زمكان منحنٍ هو أنبوب كوني جيوديسي. الجسم المتحرك بدون مقاومة، أي بتأثير القصور الذاتي (بدون تسارع زمكاني منحنٍ)، يُمَثّل بأنبوب كوني جيوديسي؛ إذا تسارع الجسم، فسوف يتشوه أنبوبه الكوني، أي يحيد عن شكله الجيوديسي. وعلى عكس السرعة النسبية التي لا يمكن الكشف عنها، من المفروض أن يُكتشف التسارع المطلق تجريبيًا. وقد اتضح بالفعل أن انتشار الضوء في إطار إسناد لاقصوري، يكون فيه الجسم المتسارع ساكنًا، يكون لامتماثلاً اتجاهيًا – تعتمد السرعة المتوسطة للضوء على تسارع الجسم. (سرعة الضوء هي c في جميع أُطر الإسناد القصورية في النسبية الخاصة

وفي جميع أُطر الإسناد القصورية المحلية في النسبية العامة). تم تخصيص معظم الفصل السابع لانتشار الضوء في أُطر الإسناد اللاقصورية – وهو موضوع قد حظي بقليل من الاهتمام حتى الآن. أخْذ واقعية أنابيب الكون للأجسام التي ينتشر بينها الضوء على محمل الجد يجعل من الممكن تحديد سبب الانتشار اللامتماثل اتجاهيًا للضوء في مثل تلك الأُطر – انحناء تلك الأنابيب الكونية. اتضح أيضا أن انحناء الأنابيب الكونية للباعث وللمستقبِل في تجربة الانزياح الأحمر الثقالي هو الذي يتسبب في هذا التأثير، وليس انحناء الزمكان كما جاء في بعض الكتب عن النسبية العامة (وهو ما يتضح أيضا من حقيقة أن الانزياح الأحمر الثقالي موجود في مجال الجاذبية المتجانس وفي أُطر الإسناد المتسارعة، حيث يكون انحناء الزمكان صفرا). إن اعتبار الانتشار اللامتماثل اتجاهيًا للضوء في الأُطر اللاقصورية يعطي أيضًا فهمًا حقيقيًا وأعمق لتأثير ساجناك.

يبين الفصل الثامن أن الجهد والمجال الكهربيين لشحنة لاقصورية يمكن حسابهما *مباشرة* في إطار الإسناد اللاقصوري الذي تكون فيه الشحنة ساكنة (من دون الحاجة إلى تحويل المجال من إطار قصوري متحرك بالتلازم أو محلي) إذا ما تم اتخاذ سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيًا في ذلك الإطار بعين الاعتبار. لقد تَبيَّن أن متوسط سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيًا في إطار الإسناد اللاقصوري تؤدي إلى عنصر حجمي لامتماثل اتجاهيًا (شبيه لينارد–فيشيرت) غير مُلاحَظ حتى الآن، يؤدي استخدامه إلى تعبيرات سليمة للجهد الكهربي والمجال الكهربي لشحنة في ذلك الإطار حيث إن العنصر الحجمي اللامتماثل اتجاهيًا يفسر المعامل ½ في جهد فيرمي لشحنة في مجال جاذبي والمعامل 4/3 في القوة الذاتية المؤثرة على شحنة لاقصورية.

يطرح الفصل التاسع سؤالاً طبيعيًا: إذا كان الأنبوب الكوني المُشوه لجسم متسارع هو جسم واقعي رباعي الأبعاد، فهل يمكن النظر إلى القوة القصورية التي تقاوم تسارع الجسم على أنها نابعة من إجهاد رباعي الأبعاد في الأنبوب الكوني الخاص بالجسم وتنشأ عندما يتشوه الأنبوب الكوني؟ تعرض هذا الفصل لتوضيح أن القصور الذاتي هو مظهر آخر للبعدية الرباعية للكون، وعلى الرغم من أن وجود القصور الذاتي لا يمكن اعتباره دليلاً محددًا على واقعية الزمكان، فقد تبين في هذا الفصل أنه، إذا كان الكون رباعي الأبعاد، فإن القصور الذاتي يجب أن يكون موجودًا.

الفصل العاشر يستكشف تضمينات واقع الزمكان في فيزياء الكم. وبما أن الزمكان هو بلا شك ساحة تنافس على المقياس الكمومي أيضًا، فيبدو من الطبيعي أن يُطرح سؤال عن طبيعة الجسم الكمومي في الزمكان، مما يؤدي إلى إدراك أنه ليس خطًا كونيًا. يبدو أن هذا يدل ضمناً على عدم وجود الأجسام الكمومية بشكل مستمر في الزمن. كما يبدو أن الأسئلة الصريحة حول طبيعة الأجسام الكمومية توضح أن سلوكها الاحتمالي والصورة الزمكانية المعطاة دائمًا للكون لا يتعارضان على الإطلاق.

الجزء الأول

من جاليليو إلى منكوفيسكى

أهداف الجزء الأول

بما أن فرضية [النسبية] أتت لتعني أن الكون رباعي الأبعاد في المكان والزمان هو فقط الذي يُستدل عليه بالظواهر، فإن الإسقاط في المكان والزمان ربما لايزال يعالَج بدرجة حرية معينة، أُفضِّل أن أطلق عليها "فرضية الكون المطلق".

هـ. منكوفيسكى [١١، ص ٨٣]

الهدف الرئيسي لهذا الجزء هو إظهار أنه توجد صلة منطقية بين مبدأ النسبية لجاليليو وصياغة منكوفيسكى رباعية الأبعاد للنسبية الخاصة.

يعود الفصل الثاني إلى حجج جاليليو التي استخدمها في دحض رؤية أرسطو للحركة، والتي أدت به إلى مبدأ النسبية المنسوب إليه، والذي بمقتضاه لا يمكن الكشف عن الحركة المنتظمة المطلقة بواسطة تجارب ميكانيكية.

يقدم الفصل الثالث تحليلاً لكشف المعنى الفيزيائي لهذا المبدأ. نتائج هذا التحليل نوعًا ما غير متوقعة – لا يمكن الكشف عن الحركة المنتظمة المطلقة لأنها غير موجودة. بل إن الأكثر مفاجأة هو ما يكمن وراء عدم وجود الحركة المنتظمة المطلقة – لا يوجد فقط فضاء واحد ثلاثي الأبعاد، بل العديد من تلك الأفضية. هذا بدوره يكون ممكناً فقط في كون ذي أربعة أبعاد على الأقل. يقتضي التحليل في هذا الفصل أن تكون صياغة منكوفيسكى رباعية الأبعاد للنسبية الخاصة متضمّنة من حيث المنطق في مبدأ النسبية لجاليليو، وكان من الممكن اكتشافها في وقت سابق.

يطور الفصل الرابع فكرة بسيطة – إذا كان الكون رباعي الأبعاد يعطَى فيه الزمن بالكامل على أنه البعد الرابع، فيجب أن يكون كيانًا متآلفًا يعطَى دفعة واحدة، ويجب أن يماثل الفضاء الإقليدي العادي ثلاثي الأبعاد لأنه هو أيضًا يعطَى دفعة واحدة. في مثل هذه الحالة يجب أن تكون العلاقات بين الخطوط الكونية (التي تحتوي على التواريخ الكاملة للأجسام الفيزيائية) في هذا الكون رباعي الأبعاد مشابهة للعلاقات المقابلة لها بين الخطوط في الفضاء الإقليدي. لهذا عندما تُعَرَّف العلاقات بين الخطوط الكونية في الكون رباعي الأبعاد، المقابلة للعلاقات الإقليدية بين الخطوط، يجب أن ينظر للعلاقات بين الخطوط الكونية على أنها مظاهر لبعدية الكون الرباعية التي يمكن اختبارها تجريبيًا. عند الحصول على تلك العلاقات في الفصل الرابع، يتضح أنها تطابق النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة. يوضح هذا، كما أكد منكوفيسكى ، أنها نظرية كون مطلق رباعي الأبعاد. هذا هو السبب في اعتقاد منكوفيسكى بأن فرضيته للكون المطلق تكشف المعنى الفيزيائي العميق للنسبية الخاصة أفضل من فرضية النسبية.

الفصل الثاني

عن استحالة الكشف عن الحركة المنتظمة

الحقائق التي تبدو في البداية بعيدة الاحتمال ، حتى بعد تفسير ضئيل، تُسقط العباءة التي تختفى وراءها وتقف بعيدًا في جمال مجرد وبسيط.

جاليليو [٢، ص ٤٠١]

كان أحد أهم الأحداث التي ميزت بداية العلم الحديث في القرن السابع عشر هو قبول نظام مركزية الشمس للكون. في عام ١٥٤٣م [٣] نشر كوبرنيكوس كتابه على نموذج مركزية الشمس في المجموعة الشمسية، ولكن قبول وجهة النظر الثورية الجديدة تلك أصبح ممكنا فقط بعد أعمال كبلر [٤] وخصوصا جاليليو [٥].

في هذا الفصل سوف نرى أن جاليليو لعب دورا حاسما في الثورة التي أحدثها كوبرنيكوس. كان أول عالم يقوم بتطبيق منهجي لما نسميه الآن المنهج الفرضي الاستنباطي(*) (صياغة الفرضيات، واستنتاج النتائج،

(*) المنهج الفرضي الاستنباطي hypothetico-deductive method، أو المنهج العلمي المعاصر، يجمع بين مفهوميْ المنهج الاستنباطي والمنهج التجريبي الاستقرائي القائم على الفرض العلمي، لأن الملاحظات التي يستوحيها الباحث فروض لابد من معالجتها بطريقة استنباطية لنولِّد من تلك الفروض نتائج نعيد تجربتها على الواقع لاختبار صحة الفروض من عدمها [المترجم]

واختبارها تجريبيا) وهو ما عرف على أنه العنصر الأساسي لحركة علمية صميمة تؤدي إلى صياغة نظرية جديدة. لقد ساعده هذا النهج على أن يدرك لماذا كانت رؤية أرسطو للحركة هي السبب الرئيسي لهيمنة النظام الكوني لمركزية الأرض المنسوب لأرسطو وبطليموس طوال الألفيتين السابقتين. و بالفعل بدت رؤية أرسطو للحركة جلية بذاتها حتى في القرن السابع عشر، نظرا لأنها أظهرت اتفاقًا تامًا مع وجهة النظر المنطقية المبنية على خبرة الحياة البشرية. من المؤكد تقريبًا أن هذا الرأي كان السبب الجوهري وراء رفض النموذج الأول لمركزية الشمس الذي طرحه أريستارخوس الساموسي (٣١٠-٢٣٠ قبل الميلاد) مباشرة بعد نظام أرسطو لمركزية الأرض في الكون.

مع أخذ هذا في الاعتبار نستطيع أن نُقَدر بشكل أفضل دور جاليليو في قبول نظام مركزية الشمس. كان لدحضه نظرة أرسطو للحركة أهمية كبيرة بحيث يمكن للمرء أن يتساءل كم من السنوات كان يلزم لأفكار كوبرنيكوس حتى تصبح معروفة إذا لم يكن جاليليو قد كتب حواره الذي يتعلق بنظامي الكون الرئيسيين – البطلمي والكوبرنيكي.

٢,١ رؤية أرسطو للحركة

لم يكن أرسطو قد عقد أي وجهات نظر غير حدسية في الحركة كما فعل الإيليون(*). فقد عكست وجهة نظره خبرة البشر اليومية وتم تلخيصها في أول جملة في الكتاب السابع من "الطبيعة": " كل متحرك لابد له من مُحَرِّك."

(*) اعتمدت المدرسة الإيليَّة في الفلسفة على أن ما يلاحظ من حركة وتغير ما هو إلا توهم وانخداع؛ والواقع الحقيقي، طبقًا لاعتقادهم، هو أن الوجود أبدي [٦،٧]. رؤية المدرسة الإيليَّة تشبه إلى حد مذهل الرؤية التي اقترحتها النسبية الخاصة، على نحو ما سوف نرى في الفصل الخامس.

اعتقد أرسطو في وجود نوعين من الحركة- حركة طبيعية للجسم الذي يميل للوصول إلى مكانه الطبيعي (مركز الأرض)، وحركة قسرية وهي التي تحتاج إلي محرك يحركها. أدرك أرسطو نفسه أن نظرته قد أدت إلى مشكلة لأنها لم تستطع أن تصف حركة المقذوفات [٨، الكتاب الثامن، الفصل العاشر]:

إذا كان أي شيء متحركًا بخلاف الأشياء التي تحرك نفسها قد حُرِّك بواسطة شيء آخر، فكيف يتأتى أن بعض الأشياء، كالأشياء المقذوفة مثلاً، تستمر في الحركة بعد أن يصبح مُحرِّكها غير ملامس لها؟

هذه بالفعل حجة واضحة ضد طريقة أرسطو التي شرح بها الحركة: إذا قمنا برمي حجر فينبغي أن يتوقف عند اللحظة التي يترك فيها أيدينا، ولكن ليس هذا ما يلاحَظ – يستمر الحجر في حركته من تلقاء نفسه حتى يرتطم بالأرضية. كان أرسطو يعتقد على ما يبدو أن حركة المقذوفات المستمرة الملاحظَة يمكن تفسيرها عن طريق افتراض أن الوسط الذي تتنقل فيه المقذوفات هو ما يحركها. في حالة الحجر فإن أيدينا، أثناء قذف الحجر، هي التي تحرك الوسط (الهواء) الذي يعمل بدوره على تحريك الحجر.

قبل مناقشة حجج جاليليو المفحمة ضد رأي أرسطو حول الحركة، دعنا نبحث بمزيد من التفصيل كيف أنها تتعارض مع نظام مركزية الشمس. ها هو مقتطف من كتاب المجسطي لبطليموس الذي استخدم فيه رأي أرسطو عن الحركة من أجل إثبات أن الأرض لا تتحرك [٩]:

بعض الناس الآن، على الرغم من أنهم لا يملكون شيئا لمعارضة هذه الحجج، يتفقون، حسب اعتقادهم، على شيء أكثر قبولا. ويبدو لهم أنه لا يوجد شيء ضد افتراضاتهم، على سبيل المثال، أن السماوات ثابتة

والأرض تدور على نفس المحور من الغرب إلى الشرق دورة واحدة تقريبًا في اليوم؛ أو أن كلا منهما ينبغي أن يتحرك إلى حد معين، ولكن فقط على المحور نفسه كما ذكرنا، وامتثالاً لأن يتبع كل منهما الآخر.

لكن فاتهم أنه بالفعل على قدر الاهتمام بمظاهر النجوم، ربما لا يوجد ما قد يمنع الأشياء من كونها متفقة مع هذا الظن الأكثر بساطة ، إلا في ضوء ما يحدث من حولنا في الهواء، فقد تبدو تلك الفكرة تافهة تمامًا. وحتى يتسنى لنا منحهم ما هو غير طبيعي في حد ذاته، وهو أن الأجسام الأخف والأرق إما أنها لا تتحرك على الإطلاق، أو بشكل لا يختلف عن تلك التي لها طبيعة أخرى، بينما تلك الأجسام الأقل خفة والأقل رقة تكون في الهواء أكثر سرعة بشكل واضح من كل الأجسام الأرضية، ولمنح فكرة أن الأجسام الأثقل والأكثر اكتنازًا لها حركتها المناسبة السريعة والمنتظمة، في حين أنه مرة أخري بالتأكيد لا تتحرك تلك الأجسام الأرضية في بعض الأحيان بسهولة بواسطة أي شيء آخر – حتى يتسنى لنا منح تلك الأشياء، يتعين عليهم التسليم بأن دوران الأرض هو الأسرع على الإطلاق من جميع التحركات التي حولها بسبب قيامها بدورة كبيرة في وقت قصير، بذلك تبدو جميع تلك الأشياء التي لم تكن ساكنة على الأرض أن لديها حركة مضادة لها، وأنه لن تُرى أبدًا سحابة تحركت في اتجاه الشرق ولا حتى أي شيء آخر حلَّق أو أُلقيَ به في الهواء، لأن الأرض كانت ستتجاوزها دائمًا بحركتها في اتجاه الشرق، وبهذا تبدو جميع الأجسام وكأنها قد تركت خلفنا تتحرك في اتجاه الغرب.

في حالة ما إذا كان ينبغي عليهم القول بأن الهواء أيضًا يتم حمله من حولنا مع الأرض في نفس الاتجاه وبنفس مقدار السرعة، فمع ذلك قد تبدو الأجسام المحتواة فيه متجاوَزَة من قبل حركتهما معًا. أما إذا كان ينبغي

حملها حولنا كما في حالة الهواء، فلن يبدو أي منهما على أنه يتم تجاوزه، ولا يتجاوز أحدهما الآخر. لكن تلك الأجسام ستظل دائما عند نَفس الموضع النسبي، ولن يوجد تحرك أو تغير لا في حالة الأجسام الطائرة ولا المقذوفات. وسوف نرى بعد ذلك بوضوح كل هذه الأشياء تحدث كما لو أن كلاً من بطئها أو سرعتها لم يكن على الإطلاق ناتجًا من حركة الأرض.

يمكن تلخيص الحجج السابقة في حجة واحدة نوقشت بواسطة جاليليو في حواره المتعلق بنظامي الكون الرئيسين – البطلمي والكوبرنيكي الذي نشر في عام ١٦٣٢ [٥، ص ١٣٩]. لننظر بعين الاعتبار إلى إسقاط حجر من أعلى البرج. إذا كانت الأرض لا تتحرك كما في وجهة النظر البطلمية، فإن الحجر سوف يقع عند قاعدة البرج. لنفترض الآن أن الأرض تتحرك (لنأخذ في الاعتبار فقط حركتها الدورانية). ستتحرك الأرض أثناء الوقت الذي يقع خلاله الحجر الساقط من أعلى البرج ولن يقع الحجر عند قاعدة البرج. وبما أن أحدًا لم يلاحظ أبدًا هذا التأثير فقد أبقى مؤيدو النظام البطلمي على فكرة أن نظام مركزية الشمس كان خاطئا.

إن الحجج المعارضة لنظام مركزية الشمس، والتي بدت مقنعة جدا لعدة قرون، استندت على رأي أرسطو بأن كل متحرك في حاجة إلى مُحَرِّك. وبالفعل إذا ما افترضنا أن الأرض تتحرك وأننا فوق برج نحمل حجرًا، نستنتج من رؤية أرسطو أن الحجر سوف يتوقف عن الحركة مع البرج عند اللحظة التي يتحرر فيها من أيدينا – المحرك (أيدينا) لم يعد مؤثرًا على الحجر بعد تلك اللحظة وسوف يتوقف عن الحركة في الاتجاه الأفقي. لهذا السبب سوف يستقر على بعد مسافة معينة من البرج. يبدو هذا التبرير للوهلة الأولى غير قابل للدحض وربما يكون هذا التفسير هو الأكثر احتمالاً بسبب سيادة النظام البطلمي على حساب نظام مركزية الشمس لأريستارخوس الساموسي.

٢,٢ كوبرنيكوس وحجج بطليموس ضد حركة الأرض

في القرن السادس عشر أوضح نيكولاس كوبرنيكوس (١٤٧٣-١٥٤٣) مرة أخرى أن الأرض لم تكن ثابتة في مركز الكون، ولكنها تدور حول محورها وتدور أيضا حول الشمس. في مؤلَّفه الأساسي "*عن دوران الكرات السماوية*"، دفع سلفًا بحجة أنه كان من الطبيعي أكثر أن نفترض أن الأرض هي التي تدور حول الشمس. ورغم ذلك، كما يتضح من الاقتباس التالي، فإنه لم يدحض حجج بطليموس ضد حركة الأرض [٣، ص ٥١٩]:

لكن دعنا نترك لفلاسفة الطبيعة الخلاف حول ما إذا كان الكون محدودًا أو لانهائيًا، ودعنا نتمسك بتأكدنا من أن الأرض تظل ممسوكة بين قطبيها وتنتهي في سطح كروي. لماذا إذًا ينبغي أن نتردد أكثر من ذلك في منحها صفة الحركة التي تتلاءم بطبيعة الحال مع شكلها، بدلا من وضع الكون كله في حالة فوضى – الكون الذي لا نعرف أو نستطيع معرفة حدوده؟ ولماذا لا نعترف بأن ظهور الدورة اليومية ينتمي إلى السماء، ولكن الواقع ينتمي إلى الأرض؟ والأمور كما هو الحال عندما قال إينياس في الإنيَّادة لفرجيل: "نحن نبحر من الميناء، وتتحرك الأرض والمدن مبتعدة عنا". في حقيقة الأمر، عندما تطفو سفينة فوق بحر هادئ، تبدو كل الأشياء في الخارج للمسافرين وكأنها تتحرك في حركة هي التصور الخاص بهم، ويعتقدون على العكس من ذلك أنهم هم أنفسهم، وجميع الأشياء التي معهم في حالة سكون. لذلك من السهل أن يحدث في حالة حركة الأرض أن يتحتم الاعتقاد بأن الكون كله يتحرك في دائرة. ثم ماذا نقول عن السحب وغيرها من الأشياء الطافية في الهواء أو التي تسقط لأسفل أو ترتفع لأعلى، غير أنه ليست فقط الأرض والعنصر المائي الملتصق معها هما ما يتحركان بهذه الطريقة، ولكن أيضا أي جزء صغير من الهواء وأيًّا من الأشياء الأخرى له

صلة مماثلة مع الأرض؟ سواء لأن الهواء المجاور، والذي يكون مختلطًا مع المادة الأرضية والمائية، يتبع نفس طبيعة الأرض، أو بسبب أن حركة الهواء حركة مكتسبة، يشارك فيها بدون مقاومة نتيجة التواصل الجغرافي والدوران الدائم للأرض.

افترض كوبرنيكوس في الأساس أن كل الأجسام يجب أن تشارك في حركة الأرض. وكما أظهر لنا تاريخ العلم، لم تكن تلك هي أفضل طريقة للرد على حجة ما. نظرا لحقيقة أن رؤية أرسطو عن الحركة كانت لا تزال هي المذهب المقبول في القرن السادس عشر، وكانت الحجج المعارضة لحركة الأرض ، والتي ترتكز على رؤية أرسطو، في ذلك الوقت حججًا صالحة بحيث كان لا بد من معالجتها بشكل صحيح. هذا هو السبب في أن إحياء نظام مركزية الشمس بواسطة أفكار كوبرنيكوس أصبح ممكنا فقط بعد دحض جاليليو لكل من رؤية أرسطو للحركة وحجج بطليموس المعارضة لحركة الأرض.

من المشجع أن نفترض من هذا النص أن كوبرنيكوس قدم ضمنيا فكرة الحركة النسبية. ومع ذلك، فإن قراءة متأنية لحجته تظهر أنه يريد ببساطة أن يشير، تماما كما يبدو للبحارة إلى أن الميناء والمدن تتحرك مبتعدة (بينما في الواقع السفينة هي التي تتحرك)، وأن السماوات تبدو لنا فقط أنها تدور، في حين أن الأرض في واقع الأمر هي (قطعًا) التي تتحرك.

٢,٣ دحض جاليليو لرؤية أرسطو عن الحركة

أدرك جاليليو بوضوح أن الحجج المعارضة لحركة الأرض ، ومن ثم المعارضة لنظام مركزية الشمس، قد استندت على مذهب أرسطو للحركة. لهذا السبب قام بدراستها بدقة ووجد أنها تتناقض مع حقائق معروفة عن

الحركة في ذلك الوقت. قام بذلك بطريقتين منفصلتين. أولاً، بين أن تفسير أرسطو لحركة المقذوفات كان خاطئًا – في الواقع، تتحرك المقذوفات في الهواء من تلقاء نفسها بمجرد رميها ، وليس بواسطة الوسط الذي تنتقل فيه. ثانيًا، قدم تحليلات لتجارب مختلفة توصلت بطريقة مستقلة إلى استنتاج أنه لكي تحافظ الأجسام على حركتها المنتظمة، فإنها لا تحتاج إلى محرك دائم. وعلى أساس هذه الرؤية الجديدة في الحركة، أثبت جاليليو أن الحجج المعارضة لحركة الأرض لم تعد صالحة، ومهد هذا الطريق لقبول نموذج مركزية الشمس في المجموعة الشمسية.

دعنا نر الآن كيف حقق جاليليو مثل هذه النتيجة الهائلة. في حواره المتعلق بنظامي الكون الرئيسين – البطلمي والكوبرنيكي، يدافع سيمبليسيو Simplicio عن نظام بطليموس، في حين يقدم سالفياتي Salviati وساجريدو Sagredo حججًا ضده.

أولا، يعطي جاليليو مثالا عن كيف ينبغي أن تعقد مناظرة علمية عن طريق ذكر الحجج الرئيسية لمعارضيه. يفعل ذلك من خلال سالفياتي [5، ص ١٢٦]:

أقوى سبب على الإطلاق مما يستشهد به هو الخاص بالأجسام الثقيلة، التي تسقط لأسفل من وضع مرتفع، وتهبط في خط مستقيم رأسي إلى سطح الأرض. يعد هذا دليلاً غير قابل للدحض على أن الأرض عديمة الحركة. فلو أنها تصنع الدورة اليومية، لكان البرج الذي تُرك الحجر ليسقط من أعلاه، والذي يكون محمولاً بواسطة اندفاع الأرض، قد انتقل بضع مئات من الأمتار في اتجاه الشرق في الوقت الذي يستغرقه الحجر في سقوطه، وسيتحتم على الحجر أن يرتطم بالأرض عند تلك المسافة من قاعدة البرج. هذا التأثير دعموه بتجربة أخرى، وهي إسقاط كرة من الرصاص من أعلى

صارٍ لقارب ساكن، مع ملاحظة مكان ارتطامها الذي يكون قريبًا من سفح الصاري؛ لكن إذا ما أُسقطت نفس الكرة من نفس المكان عندما يكون القارب متحركًا، فإنها سوف ترتطم عند مسافة من سفح الصاري تساوي تلك التي قطعها القارب أثناء الوقت الذي استغرقته كرة الرصاص في السقوط، وليس لأي سبب آخر غير أن الحركة الطبيعية للكرة عندما تترك على حريتها تكون في خط مستقيم في اتجاه مركز الأرض.

أصبح المسرح الآن معدًا لجاليليو لكي يبين أن تلك الحجج المعارضة لحركة الأرض ليست قاطعة. كما سنرى فإن قوة حجج جاليليو، المعروضة من قبل سالفياتي وساجريدو، تتحدد في ضوء حقيقة أنها تجمع بين مرجعيات من التجارب والتحليل المنطقي. وحيث إنه لا يمكن إجراء تجربة البرج على أرض تتحرك وأخرى لا تتحرك لاختبار ما إذا كانت ستعطي نتيجتين مختلفتين، فإن سالفياتي يركز على تجربة السفينة ويسأل سيمبليسيو [٥، ص ١٤٤]:

إذن أنت تقول إنه عندما تقف السفينة ساكنة يسقط الحجر عند سفح الصاري، وعندما تكون السفينة متحركة يسقط عند مسافة منه، ثم، على العكس، يستدل من سقوط الحجر عند سفح الصاري على أن السفينة تقف ساكنة، وقد يستنتج من سقوطه بعيدًا أن السفينة تتحرك. وبما أن ما يحدث على السفينة يجب بالمثل أن يحدث على الأرض، فمن سقوط الحجر عند سفح البرج، يستنتج المرء بالضرورة ثبات العالم الأرضي، هل تلك هي حجتك؟

بعد أن يوافق سيمبليسيو يواصل سالفياتي [٥، ص ١٤٤]:

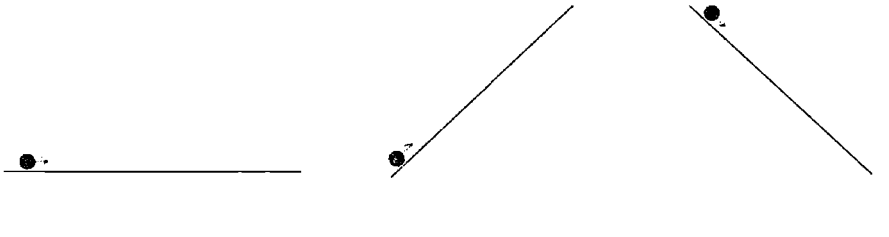
أخبرني الآن: إذا وقع الحجر المُسقط من أعلى الصاري عندما كانت السفينة تبحر مسرعة في نفس المكان بالضبط الذي وقع فيه على السفينة عندما كانت تقف ساكنة، ما الذي يمكن أن تستفيده من هذا السقوط بالنسبة لتحديد ما إذا كانت السفينة قد وقفت ساكنة أم تحركت؟

إجابة سيمبليسيو هي:" لا شيء على الإطلاق". سؤال سالفياتي التالي عما إذا كان سيمبليسيو قد سبق له من قبل إجراء "تجربة السفينة هذه". لم يفعل ذلك بنفسه ولكنه أصر على أنه يصدق المسؤولين "الذين أقروا بأنهم لاحظوها بعناية". عند هذه النقطة يعطي سالفياتي التلميح الذي ربما هو الأكثر وضوحًا بأن جاليليو أجرى التجربة باستخدام حجر يسقط من أعلى صارٍ لسفينة متحركة [٥، ص ص ١٤٤-١٤٥]:

لمن سوف يجد فعلاً أن التجربة تظهر تماما عكس ما هو مكتوب، بمعنى، أنها ستبين أن الحجر يقع دائما في نفس المكان على متن السفينة، سواء كانت السفينة متوقفة أو متحركة بأي سرعة تريدها. في هذه الحالة يصلح جيدًا نفس السبب مع الأرض كما هو الحال على متن السفينة، ولا يمكن الاستدلال على أي شيء عن تحرك أو ثبات الأرض من الحجر الذي يسقط دائما عموديا عند سفح برج.

بينما تستمر الشكوك تساور سيمبليسيو حول النتيجة التي ستسفر عنها تجربة واقعية، يهدده سالفياتي فعليًا ليدفعه إلى إدراك الاستنتاج الحقيقي دون الحاجة لأي تجارب [٥، ص ١٤٥]:

دون تجربة، أنا متأكد من أن التأثير سوف يحدث مثلما أخبرتك، لأنه يجب أن يحدث بهذه الطريقة؛ وقد أضيف أنك أنت أيضًا تعلم أنه لا يمكن أن يحدث بطريقة مختلفة، مهما كان تظاهرك بأنك لا تعلم هذا – أو أنك تعطي ذلك الانطباع. ومع ذلك أنا بارع جدا في التطرق لعقول الناس لدرجة أنني سأجعلك تعترف بهذا رغمًا عن نفسك.



شكل ٢,١ تجربة جاليليو باستخدام المستويات المائلة

ما كان يدور في عقل سالفياتي هي التجربة الشهيرة التي تتعلق بالمستويات المائلة (انظر الشكل ٢,١– أ) [5، ص ١٤٥]:

افترض أن لديك سطحًا مستويًا أملس كالمرآة مصنوعًا من مادة صلبة كالفولاذ. وأنه لا يوازي الأفق، وإنما يميل عليه بمقدار ما، ثم وضعت عليه كرة كروية تماما من مادة صلبة وثقيلة كالبرونز. كيف تتصور سلوك الكرة عندما تتحرر؟

يعطي سيمبليسيو الإجابة الواضحة: "سوف تستمر الكرة في الحركة لأجل غير مسمي، بقدر امتداد ميل السطح، وبحركة مستمرة في التسارع". ثم يسأل سالفياتي عمّا سيحدث للكرة إذا ما أجبرت على أن تتحرك لأعلى على سطح مائل بواسطة قوة دافعة مُؤَثِّرة عليها (الشكل ٢,١– ب). لا يجد سيمبليسيو أي صعوبة في الإجابة على هذا السؤال أيضًا [5، ص ١٤٦]:

سوف تبطئ الحركة بمعدل ثابت وتتأخر، لكونها مخالفة للطبيعة، لفترة زمنية قد تطول أو تقصر وفقًا لدفع أكبر أو أقل وانحدار لأعلى أقل أو أكبر.

بعد مناقشة نوعي المنحدر هذين، يأخذ سالفياتي الخطوة المنطقية التالية [٥، ص ١٤٧]:

أخبرني الآن ما الذي سيحدث لنفس الجسم القابل للحركة إذا ما وضع على سطح بدون انحدار لأعلى أو لأسفل.

يبدو سيمبليسيو في حيرة قليلا [٥، ص ١٤٧]:

هنا لا بد لي من التفكير لحظة في إجابتي. لا يوجد انحدار لأسفل، فلا يمكن أن يكون هناك استعداد طبيعي للحركة؛ ولا يوجد انحدار لأعلى، فلا يمكن وجود مقاومة لتحركها، إذاً سيكون هناك لا مبالاة بين الميل للحركة ومقاومتها. وبذلك يبدو لي أنه يجب بطبيعة الحال أن يظل مستقرّا.

الآن يسأل سالفياتي السؤال الحاسم [٥، ص ١٤٧]:

ولكن ماذا سيحدث إذا ما تم منحه قوة دفع في أي اتجاه؟

بما أن سيمبليسيو "لا يستطيع أن يرى أي سبب للتسارع أو التباطؤ، ولا يوجد انحدار لأعلى أو لأسفل"، فسيصل حتما إلى استنتاج مفاده أن الكرة سوف تستمر في التحرك "بقدر استمرار امتداد السطح دون ارتفاع أو هبوط." هذا الاستنتاج يجعله متفقًا مع ما قاله سالفياتي [٥، ص ١٤٧]:

إذا لو كان هذا الفضاء غير محدود ، فإن الحركة عليه ستكون بالمثل بدون حدود؟ أيْ دائمة؟

يكمل سالفياتي حجته [٥، ص ١٤٨]:

والآن بالنسبة للحجر أعلى الصاري؛ هل هو لا يتحرك، محمولاً بواسطة السفينة ليذهب كل منهما على طول المحيط لدائرة حول مركزها؟ وبالتالي ألا يوجد بها حركة غير قابلة للفصل، فتُزال جميع العوائق الخارجية؟ وهل هذه الحركة ليست بنفس سرعة السفينة؟

بعد أن يعترف سيمبليسيو بأن "هذا صحيح، ولكن ماذا بعد"، يحثه سالفياتي [٥، ص ١٤٨]:

تفضل وارسم النتيجة النهائية بنفسك، إذا كنت بنفسك قد عرفت كل مقدمات القياس.

سيمبليسيو يرى بالفعل ما تسفر عنه المقدمات [٥، ص ١٤٨]:

تقصد بالنتيجة النهائية أن الحجر، المتحرك بحركة مُؤَثِّرة على نحو غير ثابت، لن يترك السفينة ولكنه سيتبعها، وسوف يقع في نهاية المطاف عند نفس المكان الذي يقع عنده عندما ظلت السفينة بلا حركة.

ومع ذلك، فإنه لا يزال يرفض قبول النتيجة النهائية، ويقدم حجة مضادة تقوم على تفسير أرسطو لحركة المقذوفات [٥، ص ١٤٩-١٥٠]:

أعتقد أنك تعلم أن المقذوف يتم حمله بواسطة الوسط، وهو الهواء في هذه الحالة. لذلك إذا كان ذلك الحجر الذي سقط من أعلى الصاري يتبع حركة السفينة، فهذا التأثير يجب أن يُعزى إلى الهواء، وليس إلى القوة المؤثرة، ولكنك تفترض أن الهواء لا يتبع حركة السفينة، وأنه هادئ. علاوة على ذلك، فإن الشخص الذي يسمح للحجر بالسقوط لا يحتاج إلى القذف به أو إعطائه أي دفعة باستخدام ذراعه، ولكن عليه فقط أن يبسط يده ويتركه ليسقط. لذلك لا يمكن للحجر أن يتبع حركة القارب سواء عن طريق أي قوة مؤثرة عليه بواسطة قاذفه، أو عن طريق أي مساعدة من الهواء، وبالتالي فإنه سيبقى في الخلف.

أخفق سيمبليسيو في رؤية ما هو واضح – وهو أن حركة القارب مؤثرة على الحجر بواسطة يد الشخص الحامل له؛ فببساطة يسحب الحجر في نفس اتجاه السفينة المتحركة. حيث إن الدفاع الأخير لسيمبليسيو هو

قضية المقذوفات، كان على سالفياتي أن يتعامل أخيرا مع العنصر الأضعف، ولكنه الفاصل في رؤية أرسطو عن الحركة – تفسيره لما يحرك المقذوفات [٥، ص ١٥٠]:

أرى أن اعتراضك يستند كليا على عدم وجود قوة مؤثرة، فإذا ما بينت لك أن الوسط لا يلعب دورا في الاستمرارية لحركة المقذوفات بعد انفصالها عن قاذفها، هل تسمح بوجود قوة مؤثرة؟ أم أنك سوف تنتقل ببساطة إلى هجمة أخرى موجهة نحو تدميرها؟

سيمبليسيو يوافق [٥، ص ١٥٠]:

إذا تمت إزالة عمل الوسط، فإني لا أرى لدي مفرًا لأي شيء آخر غير الخاصية المؤثرة من قبل القوة الدافعة.

يطلب سالفياتي من سيمبليسيو، قبل بدء هجومه على تفسير أرسطو لحركة المقذوفات، أن يعلن بوضوح رؤية أرسطو عن "دور الوسط في الإبقاء على حركة مقذوف" [٥، ص ١٥٠]، وهذا ما يفعله [٥، ص ١٥١]:

أيًا كان من يلقي الحجر فقد حمله بيديه؛ يحرك ذراعه بمقدار ما للسرعة وبقوة ما؛ وبحركته يتحرك ليس فقط الحجر ولكن أيضًا الهواء المحيط؛ يجد الحجر، بمجرد تركه من اليد، نفسه في الهواء الذي يتحرك بالفعل بواسطة قوة دفع، وهكذا يتم حمله. لأنه إذا لم يتحرك الهواء، فإن الحجر يسقط من يد الرامي عند قدميه.

عندئذ يبدأ سالفياتي في صياغة حجته المفندة [٥، ص ١٥١]:

وهل تكون من السذاجة بحيث تسمح لنفسك أن تقتنع بمثل هذا الهراء، وأنت لديك حواسك الخاصة لدحضه ولمعرفة الحقيقة؟ انظر هنا: سيظل

حجر كبير أو قذيفة مدفع بلا حركة على طاولة في مواجهة أعتى الرياح، طبقًا لما أكدته أنت قبل قليل. هل تعتقد الآن أنه بدلا من ذلك إذا كانت هذه الكرة من الفلين أو القطن، فسوف تحركها الرياح؟

يجيب سيمبليسيو على السؤال بثقة دون أن يشك فيما سيتبع [٥، ص ١٥١]:

أنا متأكد تماما من أن الرياح كانت ستحملها بعيدا، وقد يتم ذلك أسرع كلما كانت المادة أخف وزنا. لأننا نرى هذا في السحب التي تُحمل بمقدار سرعة مساوية لسرعة الرياح التي تسوقها.

يطلب سالفياتي من سيمبليسيو الرد على سؤال واحد إضافي [٥، ص ١٥١]:

لكن إذا كان عليك باستخدام ذراعك أن ترمي حجرًا أولاً، ثم خصلة من القطن بعد ذلك، أيهما سيتحرك أسرع وأبعد؟

مرة أخرى لا يفطن سيمبليسيو إلى أنه يضعف موقفه كثيرًا [٥، ص ١٥١]:

سيحقق الحجر ذلك إلى حد كبير؛ وسوف يسقط القطن فقط عند قدمي.

الآن يجعل سالفياتي من المستحيل على أي شخص الدفاع عما افترضه أرسطو ليكون سببا لحركة المقذوفات [٥، ص ١٥١]:

حسنا، إذا كان ما يحرك الشيء المُلقى بعد أن يترك يدك هو مجرد الهواء المتحرك بواسطة ذراعك فقط، وإذا كان الهواء المتحرك يدفع المواد الخفيفة بسهولة أكثر من الثقيلة، فلماذا لا تذهب قذيفة القطن أبعد وأسرع من قذيفة الحجر؟ بالتأكيد هناك شيء محفوظ في الحجر...

هذه واحدة من أكثر الحجج الرائعة لجاليليو – إنه يستخدم التفسير الخاص بأرسطو عن كيفية انتقال المقذوفات لدحض ذلك التفسير نفسه. يبدو من المؤكد أن جاليليو اعترف بالدور الحاسم لقضية المقذوفات من وجهة نظر أرسطو. ومن أجل أن تكون حججه المعارضة لتفسير أرسطو مقنعة بقدر الإمكان، أعطى حججًا عديدة ضدها. ها هي حجة مفندة قدمها هذه المرة ساجريدو [٥، ص ١٥٢]:

لكن هناك نقطة أخرى في رؤية أرسطو أود أن أفهمها، وألتمس من سيمبليسيو أن يتكرم عليَّ بجواب. إذا أطلق سهمان بواسطة نفس القوس، أحدهما موجه بالطريقة المعتادة والآخر موجه بجنب – بمعنى، وضع السهم بالطول على الوتر وإطلاقه في نفس اتجاهه – وأود أن أعرف أيهما يذهب أبعد؟

مرة أخرى يكون سيمبليسيو على وشك مواجهة التناقضات الخفية بين مذهب أرسطو للحركة و بين حدسنا المكتسب من التجربة اليومية [٥، ص ١٥٣]:

لم أر أبدًا سهمًا يطلق من جنب، ولكن أظن أنه لن يذهب حتى واحد على عشرين من المسافة التي يقطعها الذي أطلق بسنّه أولاً.

يكشف ساجريدو الآن عن واحد من تلك التناقضات [٥، ص ١٥٣]:

لأن ذلك هو بالضبط ما اعتقدته، فإنه يعطيني هذا الفرصة لإثارة سؤال بين مقولة أرسطو وبين الخبرة. لأنه كما في تجربة، إذا كان لي أن أضع سهمين على تلك الطاولة عندما كانت تهب رياح قوية، أحدهما في اتجاه الريح، والآخر في اتجاه متعارض معها، فإن الرياح تحمل الأخير بعيدًا بسرعة وتترك الآخر. من الظاهر الآن أن نفس الشيء يجب أن يحدث مع الإطلاقين من القوس، إذا كان مذهب أرسطو صحيحا، لأن السهم الذي يطلق

من جنب قد يتم تحفيزه من قبل كمية كبيرة من الهواء تحركت بواسطة الوتر – بقدر يعادل طول السهم الكلي – في حين أن السهم الآخر يتلقى دفعة من مقدار من الهواء يعادل فقط ما هو موجود في الدائرة الصغيرة من سمكه. لا أستطيع أن أتصور سبب هذا التفاوت، وأتوق كثيرًا جدًا إلى معرفته.

ما زال سيمبليسيو لا يبدو عليه أنه يدرك التناقض [٥، ص ١٥٣]:

السبب واضح بالنسبة لي؛ إنه يُعزى إلى أن السهم الذي أطلق بسنه أولاً عليه أن يخترق فقط كمية صغيرة من الهواء، والآخر عليه أن يشق طريقه بمقدار يعادل طوله كله.

سدد ساجريدو بشرحه الضربة الأخيرة للرأي القائل بأن الوسط هو الذي يستمر في تحريك المقذوفات بعد قذفها [٥، ص ١٥٣]:

أوه، إذًا عندما تُطلَق السهام يتحتم عليها اختراق الهواء؟ ولو أن الهواء يذهب معها، أو بالأحرى لو أنه هو الشيء الحقيقي الذي يوصلها، فمن أين يمكن أن يأتي الاختراق؟ ألا ترى أنه بهذه الطريقة سوف يتحرك السهم أسرع من الهواء؟ الآن ما الذي منح هذه السرعة الأكبر للسهم؟ هل تقصد أن تقول إن الهواء يعطيه سرعة أكبر من سرعته؟

تعلم جيدا، سيمبليسيو، أن هذا الأمر كله يحدث بعكس ما يقوله أرسطو تمامًا، وبقدر ما يكون من غير الصحيح أن الوسط يضفي الحركة على قذيفة، بقدر ما يكون من الصحيح أنه هو وحده الذي يحول دون ذلك. بمجرد أن تفهم هذا، سوف تدرك دون أي صعوبة أنه عندما يتحرك الهواء حقا، فإنه يحمل معه السهم المتحرك من جنب أفضل بكثير من المتحرك بسنه أولا، لأن هناك الكثير من الهواء الذي يقوده في الحالة الأولى والقليل منه في الحالة الأخرى. ولكن عندما أُطلق بواسطة القوس، حيث يبقى الهواء ساكنًا، فإن السهم المتحرك من جنب يرتطم بقدر أكبر من الهواء، وبالتالي يلقى

إعاقة أكبر، بينما يتغلب الآخر بسهولة على العقبات من كمية الهواء الضئيلة التي تعارضه.

النتيجة التي تقضي بأن المقذوفات لا تحتاج إلى محرك لا مفر منها. بمجرد أن يصبح من الواضح أن المقذوفات لا تتحرك بواسطة الوسط ولكن من تلقاء نفسها، تكون رؤية أرسطو – كل ما هو متحرك لابد له من مُحرِّك – قد انتهت من الأساس. يطلق الآن على حركة جسم من تلقاء نفسه اسم حركة بواسطة القصور الذاتي. وهناك خلاف حول ما إذا كان جاليليو قد أدرك بوضوح فكرة الحركة بالقصور الذاتي. من السهل إيجاد الحجج التي تبدو أنها تبين أنه لم يدرك الفكرة، لا سيما في المصطلحات الأرسطية التي كان يستخدمها – الحركة "على طول المحيط لدائرة حول مركزها"، "الحركة القسرية"، "القوة المؤثرة"،... إلخ. ما يهم في نهاية المطاف، على أي حال، هو جوهر حججه – وهي أنه إذا تُرك جسم على سجيته فإنه يتحرك من تلقاء نفسه وليس بحاجة إلى مُحَرِّك دائم. وهذا هو جوهر الفكرة الأساسية للقصور الذاتي. حاول جاليليو الإجابة عن السبب في أن الأجسام الحرة تواصل التحرك من تلقاء نفسها إلى الأبد، شريطة ألا يمنعها شيء من القيام بذلك، عن طريق افتراض أن الحركة المستمرة لمقذوف تكون قسرية من قبل قاذفه. لم نفعل ما هو أفضل منه – لا يزال القصور الذاتي مستمرًا في كونه لغزًا ظاهرًا في علم الفيزياء. تتضمن حركة القصور الذاتي لجسم ما سؤالين:

- لماذا يتحرك جسم حر بانتظام إلى الأبد؟
- لماذا يقاوم جسم ما التغيير في حركته المنتظمة عندما يواجه عقبة؟

سوف يتم تناول السؤال الأول في الفصل الخامس، بينما يحاول الفصل التاسع أن يرسم الخطوط العريضة للإجابة المحتملة على السؤال الثاني.

٢,٤ مبدأ النسبية لجاليليو

دعنا نلخص طريقة دحض جاليليو للحجج المعارضة لحركة الأرض. بما أن هذه الحجج قد استندت على رؤية أرسطو للحركة، فإن جاليليو أجرى تحليلاً رائعًا وأوضح بطريقة مقنعة أنه، على عكس ما قال أرسطو، يستمر الجسم الحر في الحركة من تلقاء نفسه دون الحاجة إلى مُحَرِّك. ثم استخدم جاليليو الرؤية الجديدة للحركة في تجربتَي كل من البرج والسفينة، وأظهر أن الحجر الذي سقط من البرج أو صاري السفينة يحافظ على حركته ويقع عند قاعدة البرج أو الصاري، على التوالي. من شبه المؤكد أن جاليليو أجرى تجربة إسقاط حجر من أعلى صاري السفينة ووجد أنه يسقط دائما عند سفح الصاري بغض النظر عما إذا كانت السفينة تتحرك أو كانت تقف بلا حركة، مما يؤكد حججه. بهذه الطريقة أثبت أن التجارب التي تتعلق بحجر يسقط من برج أو من صاري سفينة متحركة لا تسفر دائما عن نتيجة، وبالتالي لا يمكن استخدامها للكشف عن حركة الأرض أو السفينة.

لذلك فإن حركة الجسم لا يمكن أن تكتشف بواسطة إجراء تجارب ميكانيكية (من نوعية التجارب التي اهتم بها جاليليو) على الجسم المتحرك نفسه. سوف نسمي الآن هذا الاستنتاج، الذي استُنتج من حقائق تجريبية، مبدأ النسبية لجاليليو: لا يمكن اكتشاف الحركة المنتظمة لجسم عن طريق إجراء تجارب ميكانيكية.

قبل طرح السؤال عن المعنى الفيزيائي لهذا المبدأ في الفصل التالي، دعنا ننهي هذا الفصل مع مقتطف آخر مشهور من كتاب جاليليو الذي يشرح بطلان جميع التجارب التي تهدف إلى إظهار أن الأرض لا تتحرك [٥، ص ص ١٨٦ - ١٨٧]:

من أجل تقديم دلالة نهائية على بطلان التجارب، يبدو لي أن هذا هو المكان المناسب لأُظهر لك طريقة لاختبارها جميعًا بمنتهى السهولة. أغلق على نفسك مع أحد الأصدقاء المقصورة الرئيسية تحت طوابق إحدى السفن الكبيرة، ويكون معك هناك بعض الذباب والفراشات، وغيرها من حيوانات صغيرة طائرة. خذ وعاء كبيرًا من الماء فيه بعض السمك؛ علق زجاجة تفرِّغ قطرة بقطرة في وعاء واسع تحتها. أثناء وقوف السفينة، راقب بعناية كيف أن الحيوانات الصغيرة تطير بسرعة متساوية المقدار في جميع أنحاء المقصورة. تسبح السمكة غير مبالية في كل الاتجاهات، وتسقط القطرات في الإناء الذي تحتها، وكذلك، عند رمي شيء ما لصديقك، لا تحتاج لقذفه في اتجاه ما بقوة أكبر منها في اتجاه آخر، للمسافات المتساوية؛ وأنت تقفز بقدميك معا، تجتاز مسافات متساوية في كل اتجاه. بعد أن لاحظت كل هذه الأمور بعناية (على الرغم من عدم الشك في أن كل شيء يجب أن يحدث بهذه الطريقة عندما تكون السفينة واقفة بلا حركة)، اجعل السفينة تمضي بأي مقدار من السرعة تفضله، طالما أن الحركة منتظمة وليست متذبذبة في هذا الاتجاه أو ذاك. سوف تكتشف أن التغيرات الطفيفة في جميع التأثيرات لا تذكر، كما أنك لا تستطيع أن تحدد، باستخدام أي منها، ما إذا كانت السفينة تتحرك أم تقف ساكنة. في حالة القفز، سوف تقطع على الأرضية نفس المسافات كما سبق، كما أنك لن تحتاج إلى قفزات أكبر في اتجاه مؤخرة السفينة من تلك التي في اتجاه مقدمتها، مع أن السفينة تتحرك مسرعة إلى حد كبير، على الرغم من حقيقة أن الأرضية تتحرك من تحتك خلال الوقت الذي تكون فيه معلقًا في الهواء في اتجاه مضاد لاتجاه قفزتك. في حالة رمي شيء ما لرفيقك، لن تكون في حاجة إلى قوة إضافية لتوصيله إليه، سواء كان هو في اتجاه مقدمة السفينة أو مؤخرتها وأنت في الاتجاه المقابل. سوف تسقط القطرات مثلما حدث من قبل داخل الوعاء أسفلها دون أن تسقط في اتجاه

مؤخرة السفينة، على الرغم من أنه عندما تكون القطرة في الهواء تكون السفينة قد قطعت عدة أمتار. وسوف يسبح السمك في مياهه نحو الجزء الأمامي من وعائه دون أن يزيد عن الجهد الذي يبذله نحو الجزء الخلفي، وسوف يتحرك بسهولة متساوية نحو طُعم موضوع في أي مكان داخل حدود الإناء. وأخيرًا سوف تستمر الفراشات والذباب في طيرانها دون مبالاة في جميع الأنحاء. كما أنه لن يحدث أبدا أن تتركز في مؤخرة السفينة، كما لو أنها تعبت من مجاراة مسار السفينة، مع أنها تكون منفصلة عنها أثناء إقامتها فترات طويلة في الهواء. وإذا صُنع دخان عن طريق حرق بعض البخور، فإنه سوف يُشاهَد وهو يصعد في شكل سحابة صغيرة، تظل ساكنة ولا تتحرك في اتجاه واحد أكثر من آخر. إن السبب في كل هذه التأثيرات المتناظرة يكمن في حقيقة أن حركة السفينة مشتركة بين جميع الأشياء المحتواة فيها، بما فيها الهواء أيضا.

الفصل الثالث

استكشاف المنطق الداخلي لمبدأ النسبية لجاليليو

في ذكرى سافا بيتروف(*) Sava Petrov

يا لها من مفارقة مدهشة تقابلنا. الآن لدينا بعض الأمل في تحقيق تقدم.

ن. بور (نقلاً عن [٢])

إن فكرتيْ المكان والزمان اللتين أود أن أضعهما أمامكم قد انبثقتا من تربة الفيزياء التجريبية، وهنا تكمن قوتهما. فهما جوهريتان. ومن الآن فصاعدا يكون المكان بمفرده، والزمان بمفرده، محكومًا عليهما بالتلاشي إلى مجرد ظلال، وسيحافظ فقط نوع من الاتحاد بين الاثنين على واقع مستقل.

هـ. مينكوفسكي [١١، ص ٧٥]

(*) في الثمانينيات، اقترح سافا بيتروف، رئيس قسم فلسفة العلوم في معهد الأبحاث الفلسفية في الأكاديمية البلغارية للعلوم، مشروعًا بحثيًا طموحًا – استكشاف المنطق الداخلي للأفكار الأساسية، الذي هو، في الواقع، مزيد من التطوير لمنهج جاليليو في البحث العلمي، تبناه أكثر العلماء نجاحا، وخاصة آينشتين. كان الهدف هو تزويد فلاسفة العلم بوسيلة قوية يمكن أن تسمح لهم على نحو مثالي أن يحددوا ملامح اتجاهات البحوث في العلوم المختلفة وليس فقط تفسير الاكتشافات العلمية القائمة بالفعل. في ذلك الوقت قدّمت النتائج الرئيسية لهذا الفصل كتوضيح لبيان كيفية تطبيق هذه الطريقة.

هذا الفصل يسعى إلى هدفين رئيسيين: الأول، معالجة السؤال المهم عن المعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية لجاليليو، والثاني، توضيح قدرة وسيلة فعالة للبحث العلمي – استكشاف المنطق الداخلي للأفكار الأساسية. في الفصل السابق رأينا مثال جاليليو الممتاز عن كيفية عمل هذه الطريقة باستخراج معرفة خفية من حقائق معروفة، وكيف أنها تسفر عن نتائج لها تضمينات بعيدة المدى. سوف نطبق هنا نهج جاليليو لدراسة مبدئه للنسبية، وبشكل أكثر تحديدا معناه الفيزيائي. كما سوف نرى أن استكشاف المنطق الداخلي لمبدأ النسبية لجاليليو سوف يُظهر عمقه السحيق وسوف يساعدنا للوصول إلى النتيجة الغير متوقعة تماما بأن نظرية النسبية الخاصة (على نحو أكثر تحديدا صياغتها الرباعية الأبعاد التي قدمها هيرمان مينكوفسكي) متَضمَّنة منطقيا في مبدأ النسبية لجاليليو. بعبارة أخرى، كانت المعرفة الأساسية حول التمثيل رباعي الأبعاد للنسبية الخاصة مستترة كواحدة من التفسيرات الممكنة منطقيا للمعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية لجاليليو. مثل هذه النتيجة تستلزم ضمناً إمكانية اكتشاف النسبية الخاصة في وقت سابق. هنا لن نتكهن بشأن متى كان يمكن أن يحدث ذلك. سوف نقوم ببساطة بإجراء تحليل لمبدأ جاليليو على أساس ما نعرفه الآن، ونبين أنه بالفعل يحتوي على النسبية الخاصة في صياغتها رباعية الأبعاد بالمعنى الذي يمكن استخلاصه من نتيجة جاليليو التي تقضي بأن الحركة المنتظمة لجسم في الفضاء لا يمكن اكتشافها بواسطة نوعية التجارب التي اعتبرها جاليليو. بمجرد فعل ذلك، يستطيع المرء في الحقيقة أن يطرح السؤال: متى كان يمكن لنظرية النسبية واقعيًا أن تُكتشف؟

٣,١ عن المعنى الفيزيائى لمبدأ النسبية لجاليليو

لا يوجد مكان مطلق، ونحن نتصور فقط الحركة النسبية، ولا تزال الحقائق الميكانيكية مصرحًا بها في بعض الحالات كما لو أن هناك مكانًا مطلقًا يمكن إرجاعها إليه.

هـ. بوانكاريه [١٣]

عن طريق دحض رؤية أرسطو للحركة وتقديم الحجج الدامغة التي تدعمها التجارب، نجح جاليليو في إثبات أن أي تجارب من النوعية التي ناقشها مُصَمَّمة لإظهار أن الأرض لا تتحرك لن تسفر دائما عن أي نتائج. بعبارة أخرى، بغض النظر عن نوع التجارب الميكانيكية التي نجريها، لا يمكننا اكتشاف الحركة المنتظمة لجسم في الفضاء. دعوني أؤكد على وجه التحديد أن جاليليو لم يدحض النظام البطلمي للكون؛ ولكن ما دحضه هي الحجج المعارضة للنظام الكوبرنيكي. وقد قُبِلَ هذا الأخير على أنه الوصف السليم للكون على أساس مجموعة من الأسباب، معظمها من الأرصاد الفلكية، لكن أيضا طلبًا للبساطة المنطقية – وهو افتراض وحيد بأن الأرض هي التي تدور حول الشمس يُفسر كل الأرصاد الفلكية دون الحاجة إلى إدخال أفلاك تدوير(*) أو أي فرضيات أخرى من أجل هذا الغرض.

يعرض مبدأ النسبية لجاليليو ببساطة صياغة النتائج الباطلة للتجارب التي تهدف إلى اكتشاف الحركة المنتظمة لجسم ما، لكنه لا يجيب على السؤال الأساسي وهو لماذا لا نستطيع اكتشاف تلك الحركة. الطريقة التي صيغ بها هذا المبدأ – لا يمكن اكتشاف حركتنا المنتظمة في الفضاء عن

(*) أفلاك التدوير epicycles: هي مسارات الكواكب وأقمارها في نظام بطليموس، تأخذ شكل دوائر افتراضية صغيرة تتحرك على محيط دائرة أكبر تسمى الحامل أو الناقل deferent. [المترجم]

طريق إجراء تجارب ميكانيكية – تبدو أنها تقتضي ضمناً وجود تلك الحركة، ولكننا لا نستطيع اكتشافها. في نفس اللحظة التي نبدأ عندها طرح هذا النوع من السؤال – الذي يمثل بداية لما أسميناه استكشاف المنطق الداخلي لمبدأ النسبية لجاليليو – نغرق في سيل من أسئلة أخرى، ومفارقات واضحة.

السؤال العويص الأول هو: إذا كانت الأرض تتحرك، فما هو الوسط الذي تتحرك فيه؟ تجربتنا اليومية تخبرنا بأن الأجسام تتحرك في أوساط مختلفة – في الماء، والهواء،... إلخ. لذلك من الطبيعي أن نفترض أن الأرض تتحرك أيضا في وسط من نوع ما، يمكن أن يسمى الأثير، أو الفراغ، أو ببساطة الفضاء. الآن نواجه المشكلة الأولى: هل الفضاء كيان؟ منذ زمن نيوتن ولايبنتز كان هناك نقاش مستمر حول طبيعة الفضاء. يوجد رأيان متناقضان – المطلقية (الجوهرية) والعلاقاتية، اللتان تقومان على أن الفضاء عبارة عن جوهر أو مجموعة من العلاقات بين الأجسام الفيزيائية، على التوالي. لن ندخل في مناقشة ذلك هنا، ولكن من أجل تجنب سوء الفهم الدلالي، فإننا سنوضح أننا سنعني بالفضاء الكيان الذي تتحرك فيه الأرض. لا يستطيع المرء أن ينكر وجود ذلك الكيان بزعم أنه ليس سوى عدم أو مجرد مجموعة من العلاقات بين الأرض وغيرها من الأجسام السماوية. مثل هذا الإنكار يجب أن يجيب بوضوح على الحجة القديمة – وهي إذا لم يكن هناك أي شيء بين الأرض والقمر، على سبيل المثال، فلماذا لا يلامسان بعضهما؟ يجب أن يشرح أنصار العلاقاتية أيضا كيف أن الأرض يمكنها أن تتحرك في مجموعة من العلاقات بين الأجسام.

إذا كان الفضاء كياناً، فمن الواضح أنه مطلق، بمعنى أن الفضاء بالنسبة للجميع هو مجرد الفضاء لكونه كياناً واحداً. ومن ثم فإن أي حركة

في الفضاء تكون حركة مطلقة(*)، وأي سكون في الفضاء هو سكون مطلق. بهذا المعنى كان ينظر للحركة والسكون كشرطين رئيسيين في الطبيعة منذ عصر أرسطو وحتى عصر جاليليو [٥، ص ١٣٠]. نواجه الآن مشكلة أخرى – إذا اعتبرنا أن الفضاء وسط، فكما هو الحال في أي وسط آخر معروف، سوف تكون الحالة الطبيعية للأجسام في الفضاء هي السكون، وأي جسم متحرك لابد له من محرك لأن الأوساط تعوق حركة الأجسام. تساعدنا هذه المشكلة على حسن فهم وتقدير رؤية أرسطو. ما الخطأ إذاً؟ ما الذي تسبب في هذه المشكلة؟ قد يميل المرء إلى التسليم بأن الفضاء هو وسط من نوع مختلف لا يقاوم حركة الأجسام، ولهذا السبب لن يكون المحرك ضروريا. السؤال الواضح الذي ينشأ من مثل تلك الفرضية الخاصة بالموضوع هو كيف يمكن لوسط ما (إحدى سماته الأساسية هي إعاقة حركة أي جسم) ألا يبدي أي مقاومة للأجسام المتحركة.

لكي نرى أن الفرضية المُخَصَّصَه أعلاه لا يمكن أن تحل المشاكل التي يسببها الفضاء المطلق، علينا أن نواصل دراستنا لمبدأ النسبية لجاليليو. تخيل أنه في الفترة بين عصر جاليليو والقرن العشرين كان هناك مجموعة من

(*) بما أن ما يوجد وفقا لنظرية النسبية هي حركة نسبية فقط، فإن هذا يُغري أحياناً بالميل إلى الاعتقاد بأن نسبية الحركة تنطبق على الفضاء أيضًا، مما قد يعني أن الأجسام تتحرك بالنسبة إلى الفضاء والفضاء يتحرك بالنسبة إلى الأجسام. حتى لو نحينا جانبا الاعتراض المباشر بأن المرء قد يحتاج إلى فضاء آخر وهو ما تحرك داخله الفضاء الأصلي، فإن أفضل توضيح لمثل هذا الفهم الخاطئ لنسبية الحركة هو اعتبار جسمين A و B يتحركان في اتجاهين معاكسين. إذا تحرك A إلى اليسار بالنسبة إلى الفضاء وإلى B، فهذا يعني أن الفضاء وB يتحركان إلى اليمين بالنسبة إلى A. لكن بما أن B يتحرك بالنسبة إلى الفضاء وإلى اليمين بالنسبة إلى A، فإن الفضاء يتحرك لليسار بالنسبة إلى B. لذا فإن نفس الفضاء سوف يتحرك في اتجاهين متعاكسين في الوقت نفسه، إذا ما افترضنا أن الفضاء تحرك بالنسبة إلى الأجسام الفيزيائية.

العلماء بنفس براعة جاليليو. وكان هؤلاء العلماء يدرسون حجج جاليليو وأرادوا تطويرها أكثر. كانت البداية الطبيعية هي محاولة فهم المعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية الخاص به عن طريق السؤال عن سبب استحالة اكتشاف الحركة المنتظمة(*) للكرة الأرضية في فضاء، إذا كانت تتحرك، أو الحركة المنتظمة لسفينة (يرى الجميع أن السفينة تتحرك في فضاء). بعد بعض النقاش كانوا سيصلون إلى التفسيرين(**) الوحيدين الممكنين منطقيًا(***):

- هناك حركة منتظمة مطلقة ولكننا لا نستطيع اكتشافها.
- لا يوجد حركة منتظمة مطلقة ولهذا السبب لا نستطيع اكتشافها.

يبدو للوهلة الأولى أن التفسير الأول لمبدأ النسبية لجاليليو يكاد يكون من المؤكد أنه التفسير السليم للمعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية الخاص به. على الرغم من ذلك، وبفحص أدق يصبح من الواضح أنه يؤدي إلى الكثير من المشاكل، بما فيها المشكلة أعلاه – وهي أن الفضاء يجب ألا يبدي أي مقاومة للأجسام المتحركة. من ناحية أخرى، ومع ذلك، فإن التفسير الثاني يبدو أسوأ كما سنرى أدناه. من أجل هذا السبب يقرر علماؤنا أن ينقسموا إلى فريقين بحثيين، كل منهما يعني بدراسة واحد من التفسيرين لمبدأ النسبية

(*) في حالة فترة زمنية قصيرة (مثلاً، الزمن اللازم لكي يصل حجر أُسقط من برج إلى الأرضية) تكون حركة الأرض تقريبًا جيدة للحركة المنتظمة.

(**) يبدو أن تفسيرًا ثالثًا ممكنًا، وهو، أن هناك حركة مطلقة ولكن لا يمكن اكتشافها بتجارب ميكانيكية، إلا أن هذا التفسير سيتم بحثه في وقت لاحق، وسيظهر أنه إذا وجدت الحركة المنتظمة المطلقة، لكان محتمًا أن تكتشف بتجارب ميكانيكية أيضا.

(***) ما نحاول فعله هنا هو إعادة بناء تحليل فرضي كان من الممكن إجراؤه في وقت سابق على القرن العشرين. على الرغم من الصعوبة البالغة في استبعاد أي مساعدة مما نعرفه الآن، فإنني أعتقد أنه من غير الوارد تخيل أن التفسيرين لمبدأ النسبية لجاليليو (أو أي صورة منهما) كان من الممكن صياغتهما حتى في القرن السابع عشر.

لجاليليو. يمكن للقارئ متابعة تحليلات أعضاء أول فريق بحثي أكثر تقليدية يدرس التفسير الأول. هنا سوف نقوم في الجزء الرئيسي بإجراء التحليلات التي كان على الفريق البحثي الثاني الأكثر جذرية أن يقوم بها. هناك سببان لهذا الاختيار. الأول، أننا نعلم أن التفسير الثاني لمبدأ النسبية لجاليليو قد انتهى إلى أن يكون هو التفسير السليم. الثاني، أننا نعلم أيضا من تاريخ العلم (الذي يجب أن نأخذه في الاعتبار، لا سيما في ضوء ما حذر منه هيجل – ما نتعلمه من التاريخ هو أن أحدا لم يتعلم من التاريخ) أن هناك في أي وقت تفسيرات متنافسة لمشكلة صعبة، أكثرها جذرية هو الذي لديه أفضل الفرص ليكون هو التفسير الحقيقي. عند النظر إلى التفسيرين الخاصين بمبدأ النسبية لجاليليو، قد يتساءل المرء حقا عما يمكن أن يكون أكثر جذرية من التصريح بأنه لا توجد حركة منتظمة مطلقة. دعنا نرى السبب.

يبدو منطقيًا بالفعل أن يفسِّر مبدأ النسبية لجاليليو على أنه يعني أننا لا نستطيع اكتشاف الحركة المنتظمة المطلقة لأنها غير موجودة. هذا التفسير أكثر منطقية لأنه إذا كانت الحركة المنتظمة في الفضاء لا وجود لها فإن السبب في عدم إمكانية اكتشافها يصبح واضحًا على الفور. ولكن إذا لم توجد حركة منتظمة مطلقة، فإنه يترتب على ذلك عدم وجود حركة منتظمة على الإطلاق لأن الحركة المنتظمة المطلقة هي حركة في الفضاء، وإذا كانت الحركة المنتظمة المطلقة لا وجود لها فهذا يعني أن الحركة المنتظمة في الفضاء لا وجود لها أيضا. في مثل هذه الحالة ستكون الحركة الوحيدة الممكنة هي الحركة المتسارعة لأن مثل تلك الحركة يمكن اكتشافها بسبب وجود قوى القصور الذاتي. (نعرف جميعًا هذا من خلال خبرتنا اليومية؛ سوف يناقش السؤال حول واقعية قوى القصور الذاتي تحديدا في الفصل التاسع.) تكون الحركة المتسارعة مطلقة بدلالة كونها قابلة للكشف، مما

يقتضي ضمناً أنها حركة بالنسبة إلى فضاء مطلق. مثل هذا الاستنتاج يبدو أنه يدعم فريق البحث التقليدي حيث إنه، إذا كانت الحركة المتسارعة المطلقة موجودة، فإن الحركة المنتظمة المطلقة يجب أن تكون موجودة أيضا – نرى جميعًا أن كلاً من الأجسام المتسارعة والمنتظمة الحركة تتحرك في فضاء. سوف نعود إلى السؤال عما اذا كانت الحركة المنتظمة المطلقة تتطلب وجود فضاء مطلق في الفصل الرابع والفصل التاسع، ولكن دعنا نركز الآن على مشكلة الحركة المنتظمة المطلقة التي يواجهها فريق البحث الجذري. استنتاج أن الحركة المنتظمة في الفضاء لا وجود لها يعتبر مفارقة ظاهرة لأنه يصعب على أي شخص أن ينكر أن الأجسام تتحرك بانتظام في الفضاء.(*)

في هذه اللحظة قد ينتصر فريق البحث التقليدي. مثل هذا التناقض الواضح ظاهريًا مع ما نلاحظه يقيناً قد يعني أن التفسير الثاني لمبدأ النسبية لجاليليو خاطئ. لكن فريق البحث الجذري يقاوم عن طريق الإشارة إلى مفارقة أساسية تنشأ من التفسير الأول: لماذا، على سبيل المثال، لا نستطيع اكتشاف حركة سفينة بالنسبة للفضاء – نحن نرى جميعا أن السفينة تتحرك في فضاء. التفسير الأول لمبدأ النسبية لجاليليو – أن الحركة المنتظمة

(*) قد يكون هناك خلاف على ذلك، لأن أي حركة لجسم، وفقا لخبرتنا اليومية، دائما ما تتحدد بالنسبة إلى أجسام فيزيائية أخرى (لأن الفضاء غير ملموس)، ما يهم هو الحركة بالنسبة إلى أجسام أخرى (تذكر موقف أنصار العلاقاتية)، وليست الحركة بالنسبة إلى فضاء. مثل هذا الادعاء، رغم ذلك، يكون عمليًا، لأنه مبني على ما يمكننا قياسه. نستطيع قياس حركة جسم ما بالنسبة إلى أجسام أخرى، ولكن ليس بالنسبة إلى فضاء، على الرغم من حقيقة أن الجسم متحرك بوضوح في فضاء. قد تنجح العملياتية بشكل جيد عندما يكون العلم تطبيقيًا، ولكنها تكون ذات مساعدة ضئيلة أو معدومة في الحالات التي يتم فيها طرح أسئلة أساسية . السؤال الذي يسأله كلا فريقي البحث هو بالضبط سؤال عن السبب في أننا لا نستطيع قياس الحركة المنتظمة لجسم في الفضاء.

المطلقة موجودة ولكن لا يمكن اكتشافها – ربما يؤدي إلى حالة التناقض التالية: يمكننا القول بأن جسمًا ما يتحرك في فضاء (حيث إننا لا يمكن أن ننكر ما هو واضح)، ولكن القول بأن الجسم يتحرك بالنسبة إلى فضاء(*) قد يكون غير صحيح (لأن عبارة " بالنسبة إلى فضاء " تقتضي ضمنًا إمكانية قياس حركة الجسم كما في حالة جسم يتحرك بالنسبة إلى جسم آخر). هذا الوضع يبدو تناقضيًا لأن خبرتنا اليومية تخبرنا بأن "الحركة في شيء ما"، تعادل" الحركة بالنسبة لشيئ ما". لهذا السبب يبدو بالفعل، حيث إن الفضاء شيء، وكيان، أنه يترتب على ذلك أن تكون الحركة فيه مكافئة للحركة بالنسبة له. كما سنرى بعد قليل، هذه لحظة من لحظات كثيرة تمدنا عندها خبرتنا اليومية بمعرفة موثوق بها.

وبما أن كل فريق يواجه متناقضات تبدو عصيّة الحل، فإنه يمكننا تصور أنهم سيكونون جادين في العمل. وأفضل تدبير يمكن لفريق البحث الجذري أن يوظفه هو عدم الاستسلام عند الوصول إلى مثل تلك المفارقات الواضحة. بل إن بإمكانهم أن يطوروا مقاربة خاصة لمثل هذه المفارقات – وهو إذا ما بدا شيء ما أنه خاطئ بشكل واضح، فقد يُفترض أنه من الوضوح بحيث لا يكون خاطئًا. سوف يدركون بسرعة أنه عندما تناقش التناقضات المباشرة مع خبرتنا ومعرفتنا اليومية، فإن شرطًا ضروريًا للتحليل الناجح أن يحاولوا إيقاف عمل إحساسهم الفطري ويقوموا بتعريف كل شيء بدلالة العبارات المنطقية. وبعد صياغة جميع الاحتمالات المنطقية،

(*) يوجد وضع مماثل حتى في وقتنا الحاضر في إطار العروض المعيارية للنسبية الخاصة، وهو أننا نستطيع القول بأن جسمًا ما يتحرك في الفضاء (لأننا مرة أخرى لا نستطيع إنكار ما هو واضح)، ولكن ليس من السليم أن نقول إن الجسم يتحرك بالنسبة إلى الفضاء لأن هذا قد يعني أن الجسم في حالة حركة مطلقة.

يمكنهم إعادة تشغيل إحساسهم الفطري مرة أخرى. مثل هذا التدبير الذي يتطلب الكثير من التفاني لتحقيقه، قد يساعدهم على إدراك أن افتراضًا ضمنيًا واحدًا – وهو أنه لا يوجد غير فضاء واحد فقط – يتسبب في المفارقة التي يواجهونها – وهي أنه لا توجد أبدًا حركة منتظمة إذا لم تكن هناك حركة منتظمة مطلقة.

وبالفعل عندما بدأ فريق البحث الجذري في دراسة المفارقة الظاهرة، قاموا بإجراء تحليل كل كلمة في النصوص التي أدت إلى المفارقة. عبارة "لا توجد حركة منتظمة مطلقة" قد تعني أنه لا توجد أبدًا حركة منتظمة لأن جميع الأجسام التي لا تتسارع قد تكون في حالة سكون مطلق (ساكنة في الفضاء المطلق). لكن بما أن الحركة المنتظمة المطلقة تعني حركة منتظمة في الفضاء المطلق، أي في الفضاء، فإن تفسير فريق البحث الجذري لمبدأ النسبية لجاليليو بأنه لا توجد حركة منتظمة مطلقة قد يعني أيضا أنه لا يوجد فضاء مطلق.

لا يتطلب الأمر الكثير من التحليل لإدراك أن إمكانية "عدم وجود فضاء مطلق" تحتمل أيضا معنيين ممكنين هما:

- لا يوجد فضاء.
- الفضاء ليس مطلقًا.

حيث إنه من الواضح أن شيئًا ما يفصل بين الأجسام ، فإنه يبدو من غير الواقعي، حتى لفريق البحث الجذري، التصريح بأن الفضاء لا وجود له. ومن ثم يكون المعنى الوحيد المتبقي هو أن الفضاء ليس مطلقًا بمعنى أنه ليس فضاءً مشتركًا للجميع. وبناء عليه تعني عبارة "الفضاء ليس مطلقًا" أنه لا يوجد فضاء واحد فقط.

يدرك فريق البحث الجذري أنهم خططوا لتحديد الافتراض الضمني – وهو أنه يوجد فضاء واحد – الذي تسبب في المفارقة التي واجهوها. لذلك يقررون استبداله بالبديل الصريح، وهو افتراض أنه يوجد العديد من الأفضية. عندئذ يتضح فورًا أن المفارقة تتلاشى، فالحركة المنتظمة لايزال وجودها ممكنا ولكنها ليست حركة منتظمة مطلقة، وتكون طبقًا للتعريف حركة منتظمة بالنسبة للفضاء المطلق، أي بالنسبة للفضاء الوحيد. يمكن أن يكون جسم ما ساكنًا في فضاء ما، ولكنه يتحرك بانتظام بسرعات مختلفة المقدار في أفضية أخرى.

بعد هذا النجاح، تحول الباحثون الجذريون إلى المفارقة التي واجهها الفريق البحثي التقليدي لينظروا فيما إذا كانت أيضا بسبب نفس الافتراض الضمني. كما توقعوا، سلَّم زملاؤهم التقليديون بالفعل بأنه لم يوجد هناك إلا فضاء واحد فقط، مما يظهر أنه أدى إلى المفارقة. إذا كان الفضاء هو شيء واحد (كيان واحد)، فإن التعبيرين "حركة فيه" و "حركة بالنسبة إليه" يجب أن يكونا متكافئين.(*) ولكنهما ليسا كذلك، مما يبين أن الافتراض الضمني – وهو أن هناك فضاء واحدًا – ربما أدى إلى المفارقة.

(*) إن توضيح المفارقتين عزز من ثقة فريق البحث الجذري في تكافؤ التعبيرين، وأوحى لهم أكثر أنه في كثير من الأحيان تختبئ معلومات موثوقة جديدة في خبرتنا اليومية. يمكن بالطبع البحث في الخيار المنطقي بين أن شيئًا ما يمكن أن يتحرك في، وليس *بالنسبة إلى* كيان ما، ولكن تاريخ الفيزياء كما نعلم الآن، أوضح أن ذلك قد يؤدي إلى طريق مسدود.

إن ما يبدو واضحًا في حالة المفارقة الظاهرة لفريق البحث التقليدي هو ما كان سببًا لها – وهو الافتراض الضمني بأنه يوجد هناك فضاء واحد فقط. إلا أن التوضيح الكامل ربما يتطلب تحليلاً أعمق كثيرًا من تحليل المفارقة الظاهرة لفريق البحث التقليدي. وبما أننا سوف نتتبع عمل الباحثين الجذريين، فإننا لن نحاول إيجاد توضيح دقيق لمفارقة الفريق التقليدي. لكن القارئ مدعو إلى محاولة إجراء تحليل لتلك المفارقة. ربما تكون نقطة البداية الواضحة هي اختبار ما إذا كان توضيح مفارقة فريق البحث الجذري – بأن هناك أفضية عديدة – يمكنه أيضًا توضيح المفارقة الأخرى. على سبيل المثال، كان يمكن القول إن التعبير "حركة في" عادة ما يستخدم بمعنى أكثر شمولاً، وإذا كان هناك عدة أفضية، فإن "حركة في" يمكن أن تعني حركة في أي فضاء، بينما العبارة "حركة بالنسبة إلى" هو تعبير دقيق، وهنا يجب تحديد الفضاء المعين الذي يتحرك جسم بالنسبة إليه. وبهذا فإن الحقيقة التي تقتضي استحالة التحدث عن حركة بالنسبة إلى فضاء تبدو دليلاً على أن الحركة بالنسبة إلى فضاء مفرد غير ممكنة.

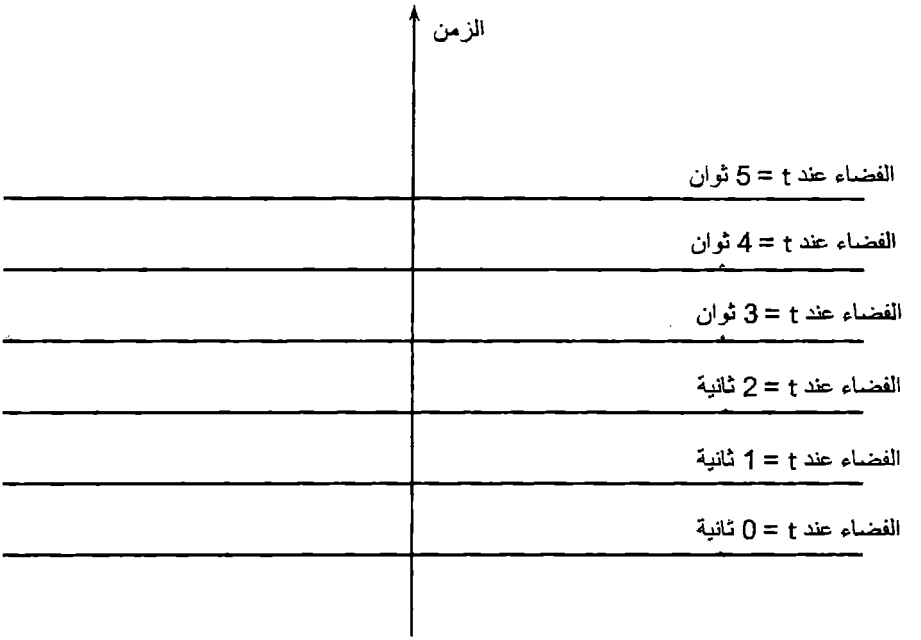
سيكون من الصعب على فريق البحث التقليدي أن يتأثر بهذا التوضيح لمفارقتهم لأنه يبطل تماما تفسيرهم لمبدأ النسبية لجاليليو، أيْ فكرة أن وجود أفضية عديدة يعني أنه لا توجد حركة منتظمة مطلقة، بمعنى أنه لا توجد حركة منتظمة في فضاء مفرد، وبالتالي في الفضاء المطلق.

حلُّ المفارقتين مذهل ويظهر قوة أسلوب استكشاف المنطق الداخلي للأفكار الأساسية . ومع ذلك، أن يكون لدينا حل منطقي لمفارقة ما شيء ، وأن نكون قادرين على ترجمة ذلك الحل في ضوء خبرتنا اليومية شيء آخر تماما. من السهل أن نقول إن هناك المزيد من الأفضية، ولكننا جميعًا ندرك أن الأجسام الفيزيائية موجودة في فضاء واحد ثلاثي الأبعاد. هذا هو السبب

في أنه من الصعب حقا، على أقل تقدير، النظر جديًا بعين الاعتبار في وجود مزيد من أفضية ثلاثية الأبعاد. وقد يحاول الباحثون التقليديون أن يسخروا من زملائهم الجذريين عن طريق الإشارة إلى أنه من الواضح تماما وجود فضاء واحد، لأن ما ندركه بحواسنا هو فضاء واحد.

لقد اكتسب فريق البحث الجذري بالفعل خبرة كافية في التعامل مع مثل تلك التناقضات الواضحة ظاهريًا مع ما نتصوره. لذا فإنهم يقولون لمعارضيهم التقليديين "دعونا نرى ما ندركه في الواقع". نرى أجسامًا على مسافات مختلفة منا ونعتقد أنها جميعًا موجودة في نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد. على الرغم من ذلك، قدَّر رومر في عام ١٦٧٦، أن الضوء ينتشر بسرعه محدودة المقدار، وهو ما أوضح أننا نرى فقط صورًا ماضية لأجسام، لأن الضوء يستغرق بعض الوقت لكي يصل إلى أعيننا من تلك الأجسام. وبما أن الفضاء الفيزيائي ثلاثي الأبعاد معرف على أنه جميع نقط الفضاء الموجودة *بالتزامن* عند لحظة معينة من الزمن، فإنه ينتج من ذلك أن الأجسام التي نراها على مسافات مختلفة منا، في الحقيقة، قد وجدت في أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد تنتمي للحظات مختلفة من الزمن (انظر شكل ٣,١).

لذا فإن ما " نتصوره" من خلال الأجسام التي نراها ليس بفضاء على الإطلاق – *نفس* "الفضاء" ثلاثي الأبعاد الذي "نتصوره" (الخطوط المائلة في شكل ٣,٢) هو في الحقيقة مجموعة قطع من أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد مناظرة للحظات مختلفة من الزمن. إن اعتقادنا، كما يبين بوضوح شكل ٣,٢، بأننا ندرك أن الأجسام تشغل نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد هو اعتقاد خاطئ.



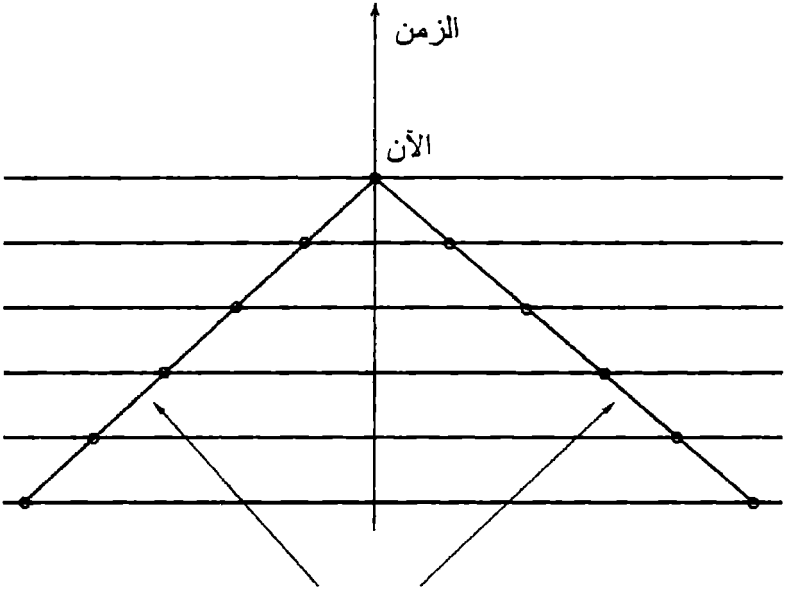
شكل ٣,١ أفضية ثلاثية الأبعاد تناظر لحظات مختلفة من الزمن.
بُعد مكاني واحد فقط هو الموضح في الشكل.

لكن الأفضية المختلفة ثلاثية الأبعاد التي تناظر لحظات مختلفة من الزمن ليست هي الأفضية ثلاثية الأبعاد التي أدت إلى توضيح المفارقتين، لأن ذلك التوضيح تطلب أنه في أي لحظة ينبغي أن يوجد هناك أكثر من فضاء. عند هذه المرحلة من التحليل لا يمكن التوصل مباشرة إلى قرار بشأن كيفية فهم فرض الأفضية المختلفة. يوجد هناك احتمالان منطقيان:

- الأفضية المختلفة غير متطابقة، مما يعني ضمناً أن هذه الأفضية هي مقاطع عرضية ثلاثية الأبعاد لفضاء له على الأقل أربعة أبعاد (على شكل خطوط مختلفة هي أفضية أحادية الأبعاد ، تكون مقاطع عرضية أحادية الأبعاد لفضاء له على الأقل بعدان).

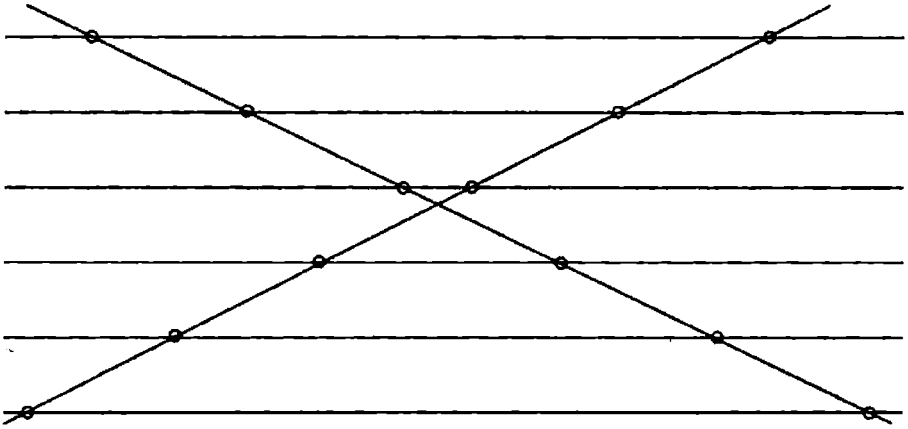
• الأفضية المختلفة متطابقة (بمعنى أنه لا توجد حاجة لفضاء له أبعاد إضافية) ولكنها في حالة حركة انتقالية.

المهم، على الرغم من ذلك، هو أننا لا " ندرك" نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد. وهذا إنجاز حاسم لأنه يمكنه أن يزودنا بتلميح عن الطريقة التي قد توجد بها أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد. إذا كان "الفضاء" الذي "ندركه" خلال الأجسام التي نراها يتكون من قطع من أفضية ثلاثية الأبعاد تناظر لحظات مختلفة من الزمن، عندئذ يكون هناك احتمال منطقي بأن الأفضية المختلفة ثلاثية الأبعاد يمكن أن تُبنى بنفس الطريقة – كأن تتكون من قطع من أفضية ثلاثية الأبعاد تنتمي إلى لحظات مختلفة من الزمن (الخطوط المائلة في شكل ٣,٣).



الفضاء المتجاوز الذى "تدركه" فى لحظة "الآن"

شكل ٣,٢ "الفضاء" الذي "تدركه" عند لحظة "الآن" يتكون من قطع (الدوائر الصغيرة) من أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد تناظر لحظات مختلفة من الزمن



شكل ٣,٣ إمكانية منطقية مبنية على حقيقة أن ما "تدركه" عند لحظة "الآن" ليس نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد – بل هو فضاءان ثلاثيا الأبعاد يتكونان من قطع من أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد تناظر لحظات مختلفة من الزمن.

أحد الاعتراضات المحتملة على هذه الإمكانية المنطقية هو أن الخطوط الأفقية في شكل ٣,٢ لا تمثل أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد؛ إنها ببساطة نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد ولكن عند لحظات مختلفة من الزمن. من المستبعد أن يتأثر فريق البحث الجذري باعتراض كهذا لأن إحساسنا الفطري هو الذي أملاه علينا، وهو ليس مرجعية موثوقة في نظر علماء ذلك الفريق؛ كلما تقدموا في تحليلهم للتفسير الثاني لمبدأ النسبية لجاليليو تضاءل اعتمادهم على الإحساس الفطري تدريجيًا. وبالفعل يستطيع فريق البحث الجذري أن يقدم مبررًا فوريًا: إذا كان تحليل مبدأ النسبية لجاليليو يتطلب وجود المزيد من أفضية ثلاثية الأبعاد، فمن الصعب عندئذ قبول حجج تفترض بشكل مسبق وجود فضاء وحيد ثلاثي الأبعاد. لن يقبل الباحثون الجذريون القول بأنه يوجد هناك فضاء وحيد ثلاثي الأبعاد يكون هو ذاته عند اللحظات المختلفة من الزمن لأن ذلك هو نفس السؤال الذي عكفوا على محاولة إجابته. إذا كان

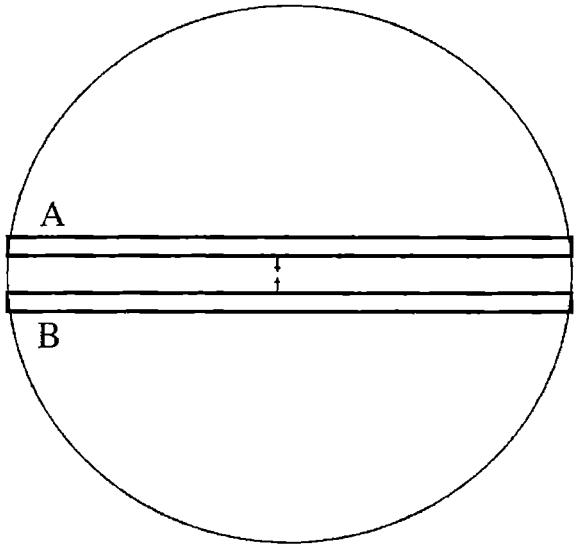
يوجد هناك في لحظات مختلفة من الزمن نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد، عندئذ يمكن تفسير افتراض أفضية عديدة ليعني أنه في كل لحظة يوجد العديد من الأفضية المتطابقة ثلاثية الأبعاد في حالة حركة انتقالية، يمكن اعتبارها، عن طريق الخطأ، نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد، لأنه، بسبب تداخلها التام، ليست هناك حاجة لفضاء ذي بعد إضافي. لكن التفسير الآخر لفرضية الأفضية المتعددة – أي أن تلك الأفضية لا تتطابق – يقتضي ضمناً أن يكون هناك أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد تنتمي إلى اللحظات المختلفة من الزمن كما هو مبين في شكل ٣,٣. ولأن أعضاء فريق البحث الجذري عند هذه اللحظة لا يعرفون أي التفسيرات لفرضية الأفضية المتعددة يكون متسقاً مع عدم وجود الحركة المنتظمة المطلقة، فإنهم بكل وضوح لا يستطيعون تقبل الرأي الشائع الذي يقضي بأن نفس الفضاء ثلاثي الأبعاد ينتمي إلى لحظات مختلفة من الزمن.

هناك نتيجة إضافية لإدراك أن الافتراض الضمني لفضاء ثلاثي الأبعاد واحد فقط ربما يكون مسؤولاً عن الصعوبة في فهم المعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية لجاليليو. حقيقة تعريف الفضاء عند لحظة معينة من الزمن على أنه جميع النقط التي تناظر تلك اللحظة تعني أن الفضاء ثلاثي الأبعاد يتكون من جميع النقط التي توجد *بالتزامن* في هذه اللحظة. إذا تم تفسير الأفضية المختلفة ثلاثية الأبعاد على أنها تعني أفضية غير متطابقة، فإنه ينتج عندئذ أن المزيد من الأفضية الثلاثية الأبعاد يقتضي ضمناً مجموعات مختلفة من النقاط الموجودة بالتزامن. لذلك، لو أن الفضاء ليس مطلقاً، في هذا التفسير نتيجة افتراض أفضية عديدة، فإن التزامن ليس مطلقا أيضًا. في التفسير الآخر لهذا الافتراض (بالنظر للأفضية المختلفة على أنها متطابقة)، لا يزال التزامن مطلقاً لأن المجموعات المختلفة من النقط، والمُشَكِّلة لأفضية مختلفة،

تناظر نفس اللحظة من الزمن. رغم ذلك، كما سنرى لاحقًا، تقتضي أفضية مختلفة في حالة حركة نسبية ضمنًا وجود مجموعات مختلفة من الأحداث المتزامنة، وهذا يعني أن التزامن ليس مطلقًا.

لقد أوضح التحليل الذي قدمناه أنه لم تكن لتوجد حركة منتظمة مطلقة إذا ما كان هناك مزيد من الأفضية ثلاثية الأبعاد. على الرغم من ذلك، لا يخبرنا ذلك الاستنتاج بأي شيء عن عدد الأفضية ثلاثية الأبعاد الموجودة، وما الذي يحدد وجودها وعددها، وما إذا كانت فرضية الأفضية المتعددة تقتضي ضمنًا وجود فضاء له بعد إضافي.

من أجل الحصول على بعض التبصر الإضافي في هذه الأسئلة، دعنا ننضم إلى فريق البحث التقليدي الذي يحاول علماؤه الإجابة على السؤال المتعلق بسبب عدم استطاعتنا اكتشاف الحركة المنتظمة المطلقة. هؤلاء العلماء، شأنهم شأن المفكرين التقليديين والمحافظين، فهم ليسوا متأثرين بحل مفارقتهم بمساعدة الفكرة الجذرية للأفضية المتعددة. الأسوأ حتى من ذلك هو أن افتراض أفضية ثلاثية الأبعاد في حالة حركة نسبية يضع حدا لفكرة الحركة المنتظمة المطلقة (مثل الحركة في الفضاء)، ومن ثم يهدد اعتقادهم الأساسي في وجود حركة منتظمة مطلقة. هذا هو السبب في أن أعضاء فريق البحث التقليدي كانوا عاكفين على التفكير في استخدام أنواع مختلفة من التجارب ليحاولوا اكتشاف الحركة المنتظمة المطلقة للأجسام. كانوا يفكرون في الأساس في إعادة صياغة التفسير الأول من مبدأ النسبية لجاليليو – بداية من "الحركة المنتظمة المطلقة موجودة ولكن لا يمكن اكتشافها" إلى " الحركة المنتظمة المطلقة موجودة ولكن لا يمكن الكشف عنها بنوعية التجارب التي ناقشها ونفذها جاليليو".



شكل ٣,٤ تجربة فكرية لسفينتي فضاء A وB في حالة سكون بالنسبة لبعضهما. وصلت كرة ضوئية، منبعثة من نقطتي المنتصف لكل من A وB (عند تقابل رأسي السهمين الصغيرين) إلى نقطتي الطرف لسفينتي الفضاء في نفس اللحظة.

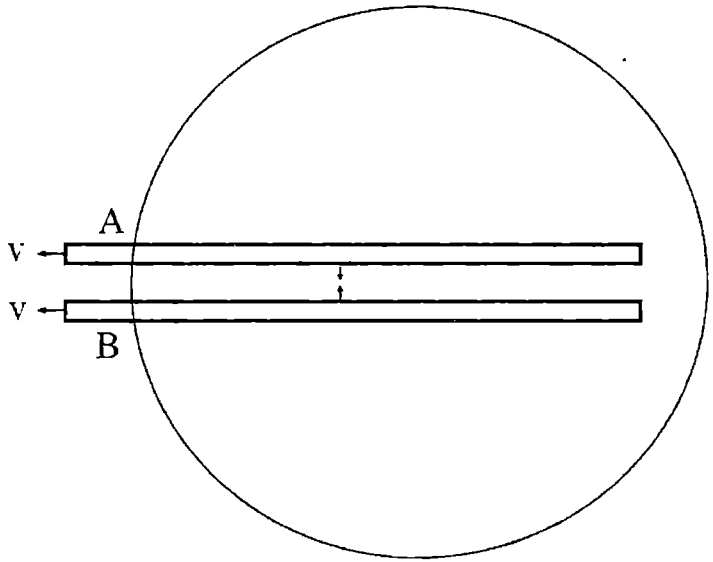
بما أن جاليليو درس فقط التجارب الميكانيكية، فإن فريق البحث التقليدي يقرر أن يرى ما إذا كانت التجارب المتعلقة بالضوء تستطيع مساعدتهم على اكتشاف الحركة المطلقة للكرة الأرضية. مثل هذه التجربة الفكرية (Gedanken)[*] لم تكن ممكنة التصور في الربع الأخير من القرن السابع عشر، لأن تجربة رومر في عام ١٦٧٦، قدرت بالفعل أن سرعة

(*) التجربة الفكرية thought experiment أو Gedanken experiment : تجربة افتراضية (تقديرية) ممكنة من حيث المبدأ، ويتم تحليلها (وليس إجراؤها) لاختبار صحة فرض علمي ما. [المترجم]

الضوء كانت محدودة المقدار. في الواقع، اشتبه جاليليو نفسه في أن الضوء انتشر بسرعة محدودة المقدار، حتى إنه فكر في تجربة لقياس مقدار سرعة الضوء باستخدام فوانيس على تلال بعيدة. كان يمكن للعلماء في القرن السابع عشر أن يستخدموا سفينتين عاديتين في تجربتهم الفكرية، ولكن دعنا نعتبر سفينتي فضاء A وB(*) (شكل ٣,٤).

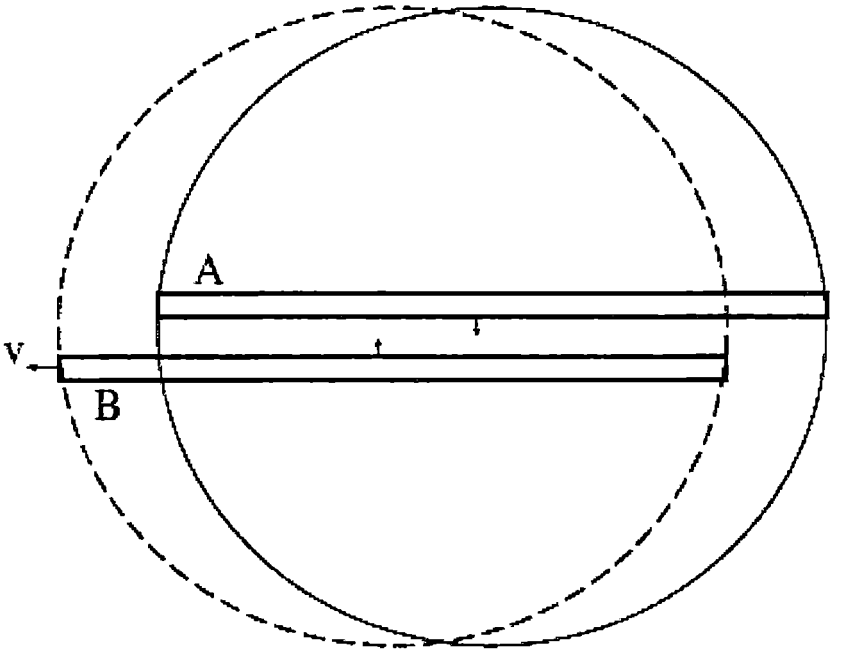
في البداية تكون سفينتا الفضاء في حالة سكون بالنسبة لبعضهما. يجري المراقبان في A وB التجربة التالية. أدت شرارة كهربية بين نقطتي منتصف A وB (يمثل السهمان الصغيران في شكل ٣,٤ قطعتين من سلك) إلى موجة ضوئية كروية وصلت بالتزامن إلى نقطتي الطرفين لسفينتي الفضاء (الدائرة في شكل ٣,٤). من الواضح هنا أن العلماء التقليديين قد افترضوا صراحة أن A وB كانتا في حالة سكون مطلق (أو ساكنتين في الفضاء المطلق). فقط في هذه الحالة سوف تصل كرة الضوء المنتشرة إلى نقطتي الطرف لكل من A وB بالتزامن؛ بخلاف ذلك، إذا كانت سفينتا الفضاء تتحركان معًا في الفضاء، فإن كرة الضوء سوف تصل إلى نقطتي الطرفين الخلفيين أولاً كما هو موضح في شكل ٣,٥.

(*) تشكل سفينتا الفضاء إطاري إسناد قصوريين أثناء حركتهما النسبية؛ أي جسم متحرك بالقصور الذاتي (بسرعة منتظمة) يمكن اعتباره إطار إسناد قصوريا.



شكل ٣,٥ تجربة فكرية لسفينتي فضاء A وB في حالة سكون بالنسبة لبعضهما، لكنهما تتحركان في الفضاء المطلق. لا تصل كرة ضوئية منبعثة من نقطتي المنتصف لكل من A وB إلى نقطتي طرفيهما بالتزامن. وصلت كرة الضوء بالفعل إلى نقطتي الطرفين الخلفيين لكل من A وB وتلاحق الآن نقطتي طرفيهما الأماميين.

افترض الآن أن B قد ذهبت بعيدًا، واستدارت للخلف وبدأت في التحرك نحو A بسرعة ثابتة. عند اللحظة التي تتطابق فيها سفينتا الفضاء لوهلة، تصنع شرارة كهربية مرة أخرى موجة ضوئية كروية متمددة. سوف يحدد المراقب في A أنه، بينما تنتشر الموجة الضوئية نحو نقطة طرف B الخلفي، تتحرك B في الاتجاه المعاكس، وسوف تصل الموجة الضوئية إلى نقطة طرف B الخلفي قبل الوصول إلى نقطة طرفها الأمامي، حيث إنه طبقًا لمراقبِي A سيقطع الضوء مسافة أقل لينتقل إلى نقطة طرف B الخلفي (شكل ٣,٦).



شكل ٣,٦ تجربة فكرية لسفينتي فضاء في حالة حركة نسبية

السؤال الفاصل الآن هو: بماذا سيجزم المراقبون في B؟ إذا لاحظوا ما يشاهده الأشخاص في A، فإنها قد تكون نهاية مبدأ النسبية لجاليليو، لأن المراقبين في B كانوا سيجدون اختلافًا بين التجربة التي أجروها في شكل ٣,٤ وبين نفس التجربة عندما كانوا يتحركون بالنسبة إلى A كما هو مبين بشكل ٣,٦. في الحالة الأولى لاحظ الأشخاص في B أن الضوء وصل بالتزامن إلى نقطتي نهايتي B، في حين أنه في التجربة الثانية كانوا سَيَرون أن الضوء وصل إلى نقطة طرف B الخلفي أولاً. لهذا سيكون باستطاعة مراقبي B القول بأنهم قد اكتشفوا حركتهم المنتظمة المطلقة عن طريق إجراء تجارب غير ميكانيكية تستخدم الضوء.

يمكن للقارئ أن ينضم مرة أخرى إلى فريق البحث الجذري المنتصر ويحاول معهم فهم السبب في فشل التجارب الميكانيكية في اكتشاف حركة منتظمة مطلقة. ولكن قبل أن أتمنى لك حظًا سعيدًا في هذه المهمة التي تبدو سهلة، أود أن أدعوك إلى الاستمرار في متابعة تحليل فريق البحث الجذري، كتدريب في التفكير التحليلي والإبداعي. خُذ في الاعتبار ما ذكَّر به الباحثون الجذريون زملاءهم التقليديين – من أن أنصار النظام البطلمي اعتبروا بالمثل أن تجربة البرج حجة دامغة ضد نموذج مركزية الشمس في المجموعة الشمسية.

مهما كان القدْر الذي قد يبدو عليه علماء فريق البحث الجذري من غرابة الأطوار، فإنهم فقط لا يعتقدون أن المراقبين في B سوف يحددون ما يجده الأشخاص في A. لا يمكن للفريق الجذري أن ينظر بعين الاعتبار لمثل هذا الخيار لأنه يعني أن مراقبي B كانوا سيكتشفون حركتهم المنتظمة المطلقة – وهي شيء لا وجود له من وجهة نظر هذا الفريق. لذلك، يتوجب على الناس في B أن يلاحظوا بالضبط نفس الشيء الذي لاحظوه عندما كانوا في حالة سكون بالنسبة إلى A: أي أن كرة الضوء وصلت إلى نقطتي طرفي B بالتزامن. ولكن هناك جائزة مفاجِئة لهذا المطلب، إن كرة الضوء تستطيع الوصول إلى نقطتي طرفي B بالتزامن فقط إذا كان مقدار سرعة الضوء ثابتًا، ولا يعتمد على حالة حركة المصدر أو المراقب. لتكن لدينا رؤية أوضح لهذا الاستنتاج، افترض أن B ترى ما يراه الأشخاص في A. هذا يعني أنه بالنسبة إلى B ينتقل الضوء نحو نقطة B الخلفية أسرع من انتقاله نحو نقطة B الأمامية (لأن الضوء ينتقل خلال المسافة من نقطة منتصف سفينة الفضاء B إلى نقطة الطرف الخلفي في زمن أقل). مثل هذه الملاحظة

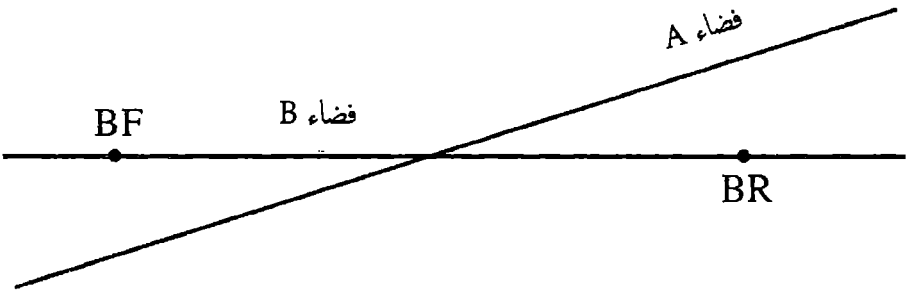
قد تكون متسقة مع مفهوم الحركة المنتظمة المطلقة: تتحرك سفينة الفضاء B في الفضاء المطلق حيث ينتشر الضوء بسرعة مقدارها c، وحيث إن B تتحرك لليسار بسرعة مقدارها v، سوف يبدو للمراقبين في B أن الفضاء هو ما يتحرك لليمين بسرعة مقدارها v حاملاً الضوء المنتشر؛ هذا يعني أنه بالنسبة إلى B ستكون سرعة الضوء مقدارها v+c، حيث إنها تتحرك لليمين في الفضاء ويبدو الفضاء نفسه أنه يتحرك لليمين بالنسبة إلى B. بنفس الحجة سوف يكون مقدار سرعة الضوء المنتقل نحو نقطة طرف B الأمامي بالنسبة إلى B هو c-v. بهذه السرعة، سوف يصل الضوء إلى نقطة طرف B الخلفي أولاً، مثلما حدد أيضًا مراقبو B، مما قد يفسر السبب في أن كلاً من A وB سوف يلاحظان نفس الشيء.

يجب التأكيد على أن ثبات مقدار سرعة الضوء ينتج من التفسير الثاني لمبدأ النسبية لجاليليو. إذا كان مقدار سرعة الضوء ليس ثابتًا كما رأينا في الفقرة السابقة، فهذا يعني أنه كان يمكن اكتشاف حركة منتظمة مطلقة.

إن ثبات مقدار سرعة الضوء هو بالفعل مخالف للحدس تمامًا، لكنه ينتج مباشرة من التفسير الثاني لمبدأ النسبية لجاليليو وينبغي تحليله لفهم معناه الفيزيائي. يمكن أن يحدث هذا عن طريق استدراك حقيقة أن فريق البحث الجذري قد توصل بالفعل إلى استنتاج أن هناك المزيد من الأفضية ثلاثية الأبعاد، وليس مجرد فضاء واحد. إذا كان لدى المراقبين في A وB فضاءان مختلفان ثلاثيا الأبعاد، فلن يكون ثبات مقدار سرعة الضوء لغزًا بعد الآن – يقيس كل مراقب مقدار سرعة الضوء في الفضاء ثلاثي الأبعاد الخاص به، ولهذا السبب دائمًا ما يجد أن الضوء ينتشر هناك بنفس مقدار السرعة c.

هناك مشكلة أخرى تنشأ من التجربة الفكرية في شكل ٣,٦ وهي الخلاف بين مراقبي A وB على ما إذا كان الضوء يصل إلى نقطتي طرفي B بالتزامن أم لا. يخبرنا إحساسنا الفطري أن خلافًا كهذا هو مفارقة واضحة. رغم ذلك، سنكتشف عندما نفحص مرة أخرى افتراضاتنا الابتدائية أننا افترضنا ضمنا أن التزامن مطلق. كيف نعرف هذا؟ هل لدينا أي حجج لدعم مثل تلك الفرضية؟ لن يُفاجأ الباحثون في فريق البحث الجذري بالخلاف بين A وB على ما هو متزامن فقط، ولكنهم سيكونون متحمسين إلى حد كبير لأن التجربة الفكرية المقدمة بواسطة الفريق التقليدي يمكنها مساعدتهم على استبعاد أحد التفسيرين المحتملين لفرضية الأفضية المتعددة. كما رأينا، تقتضي تلك الفرضية بالفعل ألا يكون التزامن مطلقًا إذا كانت الأفضية المختلفة تصنع زاوية مع بعضها بعضا، مما يتطلب أفضية ذات أربعة أبعاد على الأقل؛ فقد يكون التزامن مطلقًا فقط إذا وجد فضاء وحيد ثلاثي الأبعاد أو إذا كانت هناك أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد في حالة حركة نسبية، لكنها كانت متراكبة، وبذلك لم تكن هناك حاجة لفضاء ذي أبعاد إضافية لاستيعاب أفضية متعددة. وبناء عليه فإن التجربة الفكرية الموضحة بالرسم في شكل ٣,٦ تستبعد بالفعل التفسير بأنه يمكن لأفضية متعددة أن تتحرك بالنسبة لبعضها انتقاليًا بحيث تكون البعدية الثلاثية للفضاء محفوظة.

دعنا نرى الآن ماالمعلومات الإضافية التي يستطيع فريق البحث الجذري الحصول عليها من تحليل شكل ٣,٦. الحقيقة التي تقضي بأنه بالنسبة للمراقبين في سفينة الفضاء A في شكل ٣,٦ تصل الكرة الضوئية المنتشرة إلى نقطة الطرف الخلفي لسفينة الفضاء B (الحدث BR) أولاً ثم إلى نقطة طرفها الأمامي (الحدث BF)، بينما يزعم المراقبون في B أن الحدثين كان يجب أن يقعا بالتزامن، يمكن تصويرها كما في شكل ٣,٧.



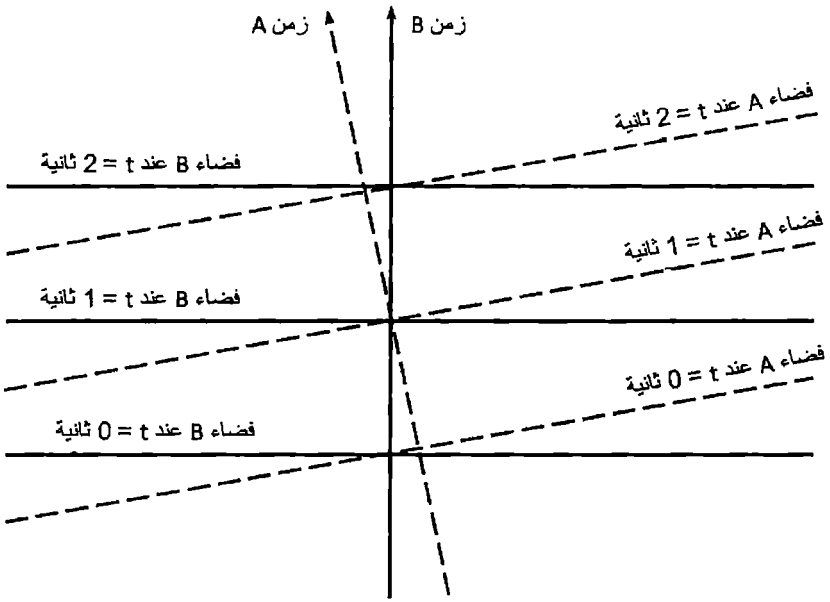
شكل ٣,٧ التزامن ليس مطلقًا بالنسبة للمراقبين في سفينتي فضاء A وB في حالة حركة نسبية.

يمكن لفريق البحث الجذري أن يتحقق بسهولة من أنه إذا كان للمراقبين في A وB فضاءان مختلفان، فيجب أن يكون لديهما أزمنة مختلفة أيضًا. إن ما يساعدهم على التوصل لهذا الاستنتاج هو النقاش حول أن الأفضية المختلفة تناظر كل لحظة من الزمن كما هو موضح في شكل ٣,١. تطبيقًا على مراقبي A وB، هذا يعني أن المجموعتين المختلفتين من الأفضية المناظرة للحظات مختلفة لكل مراقب تعيِّن *أزمنة مختلفة* لكلا المراقبين كما هو موضح في شكل ٣,٨.

سوف يكون باستطاعة الفريق الجذري الآن الإدراك الكامل للنتائج العميقة لمبدأ النسبية لجاليليو. أدت ملاحظات وحجج جاليليو بأن الحركة لا يمكن الكشف عنها بواسطة إجراء تجارب ميكانيكية إلى استنتاج أنه لا توجد حركة منتظمة مطلقة، وهذا بدوره يكون ممكنًا فقط إذا كان هناك المزيد من الأفضية ثلاثية الأبعاد. أظهر تحليل التجربة الفكرية المقترحة من قِبَل فريق البحث التقليدي لاكتشاف الحركة المنتظمة المطلقة بمساعدة إشارات ضوئية أن الحركة المنتظمة المطلقة يمكن اكتشافها فقط اذا كان مقدار سرعة الضوء ليس ثابتًا وكان التزامن مطلقًا. بمعنى آخر، إذا كانت الحركة المنتظمة المطلقة ليست موجودة (وبالتالي لا يمكن الكشف عنها)، تكون هناك نتيجتان مباشرتان:

- مقدار سرعة الضوء ثابت
- التزامن ليس مطلقًا

ساعدت هذه النتيجة فريق البحث الجذري على استنتاج أن فرضية وجود أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد يتطلب فضاء ثلاثي الأبعاد مع إضافة الزمن على أنه البعد الرابع، لأن الأفضية ثلاثية الأبعاد الغير متطابقة يمكنها أن توجد فقط في صورة مقاطع عرضية ثلاثية الأبعاد لفضاء ذي أربعة أبعاد على الأقل. على الرغم من ذلك، يبدو أن هذا الاستنتاج يقتضي ضمنًا أن يكون الكون نفسه رباعي الأبعاد. يصبح هذا جليًا عندما يُطرح صراحة سؤال بُعْدِيَّة الكون. يستدرك أعضاء فريق البحث الجذري أنه، منذ عهد أرسطو، كان يُنظَر للكون أنه ثلاثي الأبعاد (انظر [٥، ص ص ٩-١٠]).



شكل ٣,٨ نسبية التزامن تقتضي ضمنًا وجود أفضية مختلفة وأزمنة مختلفة

ولكن ما الكون؟ إن ما تخبرنا به حواسنا هو أن كل ما نراه في اللحظة الحاضرة هو الموجود. على الرغم من ذلك، بعد أن عيَّن رومر أن مقدار سرعة الضوء محدود، أصبح واضحًا أن ما نراه عند لحظة "الآن" وُجد في وقت مضى. منذ ذلك الحين كانت الرؤية الحسيَّة العامة (أو ما يسمى الآنيّة) تقضي بأن الكون هو الحاضر معرفٌ على أنه كل ما هو موجود *بالتزامن* عند اللحظة الحاضرة. الشيء الأساسي لفريق البحث الجذري هو أن الحاضر – الكون ثلاثي الأبعاد عند لحظة "الآن" – معرف بدلالة التزامن. وهذا يعني أن نسبية التزامن تؤثر مباشرة على الرؤية الآنيّة – بوجود مجموعتين مختلفتين لأحداث متزامنة، يكون لدى مراقبي A وB في شكل ٣,٦ حاضران مختلفان، ومن ثم كونان مختلفان ثلاثيا الأبعاد. رغم ذلك، يكون هذا ممكنًا فقط إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد مع إضافة الزمن على أنه البعد الرابع. بخلاف ذلك، إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد، يكون لدى المراقبين في A وB فضاء مشتَرَك ثلاثي الأبعاد، ومن ثم مجموعة مشتَرَكة من الأحداث المتزامنة، مما يعني أن التزامن قد يكون مطلقًا.

إلا أن القول بكون رباعي الأبعاد مضاد للحدس تمامًا. ولأن البعد الزمني محدد بالكامل في كون رباعي الأبعاد، مثل الأبعاد المكانية الثلاثة، فإنه لا يحدث شيء في كون كهذا – فهو كون مجمد، أبدي الوجود. عند هذه النقطة يواجه الفريق الجذري تحديه الأعظم – كيف يمكن لأحد أن يزعم بجدية أن الكون الخارجي مختلف بشكل كبير عما تخبرنا به حواسنا؟ بل إن بعض أعضاء هذا الفريق يجدون أنهم قد اكتفوا تماما بما حصّلوه من تَتَبُّع الخيارات الجذرية فقط في تحليل مبدأ النسبية لجاليليو، وربما يشعرون بأن الانضمام إلى فريق البحث التقليدي هو الأكثر عقلانية. لذا دعنا نرى ما المشاكل التي سوف يضطرون إلى التعامل معها عندما يبدءون بحثهم مع زملائهم التقليديين.

سلم هذا الفريق بفرضية أن الحركة المنتظمة المطلقة قد وجدت بالفعل ولكن لسبب ما لم نستطع الكشف عنها. ولكي يعرفوا ما إذا كان يمكن استخدام الضوء للكشف عن حركة مطلقة، افترضوا التجربة الفكرية الممثلة في الشكلين ٣,٤ و٣,٦. على عكس فريق البحث الجذري، اقتنع أعضاء الفريق التقليدي بما هو جليّ – وهو أنه ينبغي على المراقبين في كل من سفينتي الفضاء ملاحظة أن كرة الضوء المنتشرة تصل أولاً إلى نقطة الطرف الخلفية لسفينة الفضاء B، ثم بعد ذلك إلى نقطة طرف B الأمامي. وبذلك، يصلون بطبيعة الحال إلى استنتاج أن الحركة المنتظمة المطلقة موجودة بالفعل ويمكن الكشف عنها بواسطة تجارب تستخدم الضوء. كل شيء يبدو بسيطًا للغاية وبيّنًا بذاته. ليست هناك حاجة لاستدعاء مثل هذه الفرضيات المتطرفة والغريبة عن أفضية متعددة ثلاثية الأبعاد وفضاء مُجَمَّد رباعي الأبعاد، أو لإنكار مُطلَقيَّة التزامن. الأكثر من ذلك، يرى الباحثون من هذا الفريق تناقضًا لا يمكن التغلب عليه في تفسير الفريق الجذري للتجربة الفكرية المبينة في شكل ٣,٦: لو أن التزامن نسبيٌ، كما هو واضح في الشكل، فسيكون هناك كرتَا ضوء منتشرتان تتمركز كل منهما عند منتصف كل من سفينتي الفضاء؛ ولكن، بناءً على التعريف، هناك إشارة ضوئية *واحدة*، وبالتالي يجب أن يكون هناك كرة ضوء واحدة. إن تفسير الفريق الجذري بأن كلاً من سفينتي الفضاء لها فضاؤها الخاص ثلاثي الأبعاد، ولهذا السبب يوجد فضاءان تنتشر فيهما كرتان ضوئيتان، قد رُفِض من قبل الفريق التقليدي كمثال على أنه يمكن تفسير كل شيء بمساعدة فرضيات مخصصة من أجل هذا. لقد وجد العلماء التقليديون أن التفسير الذي يقضي بإمكانية انقسام إشارة ضوئية وحيدة إلى كرتي ضوء منتشرتين ما هو إلا وهم وخيال جامح تمامًا.

وحيث إن أعضاء فريق البحث التقليدي هم أيضًا باحثون جيدون، فقد قرروا، بينما كانوا في انتظار زملائهم من مجموعة الفيزياء التجريبية لإجراء التجربة الموضحة بالرسم في شكل ٣,٦ وللتأكيد عمليًا على وجود الحركة المنتظمة المطلقة، أن يحللوا السؤال الوحيد المفتوح – وهو لماذا فشل جاليليو في الكشف عن الحركة المطلقة بالتجارب الميكانيكية؟

تبدو الإجابة واضحة، كما رأينا في الفصل الثاني، إنه القصور الذاتي للجسم المشارك في جميع التجارب الميكانيكية المصممة لاختبار الحركة المنتظمة المطلقة هو المسؤول عن انعدام النتائج. قد يكون هذا تفسيرًا جيدًا من أجل أعضاء فريق البحث التقليدي، ولكن المستجدين من الفريق الجذري، الذين اعتادوا على طرح أسئلة أكثر من نوع "لماذا"، قد يذكرون زملاءهم الجدد بأن جوهر الوجود للقصور الذاتي يبرهن على أن الفضاء لا يبدي أي مقاومة للحركة المنتظمة للأجسام. إذًا السؤال الذي ينتج بطبيعة الحال هو: لماذا لا تواجه الأجسام معارضة من الفضاء (الذي يُعتَبَر كيانًا) خلال حركتهم فيه؟(*)

الآن سوف يجد الباحثون من الفريق التقليدي أنفسهم في مهمة غير تقليدية. ولكي يجيبوا على هذا السؤال ينبغي أن يختاروا بين فرضيتين متطرفتين:

- الفضاء هو بالفعل كيان (وسط من نوع ما – كلنا نرى أن هناك "شيئًا ما" بين النجوم في السماء المظلمة) لكنه، وبخلاف أي كيان آخر، لا يبدي أي مقاومة للحركة المنتظمة (لكن يقاوم بأعجوبة الحركة المتسارعة).
- الفضاء ليس كيانًا ولهذا السبب لا يبدي أي مقاومة للحركة.

(*) حتى إن الأعضاء السابقين لفريق البحث الجذري قد يبدءون في تحليل إمكانية أن وجود القصور الذاتي ربما يعني عدم وجود حركة منتظمة مطلقة.

من المثير للاهتمام إلى حد كبير الاستماع إلى حجج الفريق التقليدي التي تهدف إلى إقناع غيرهم من العلماء التقليديين، الذين لم يشاركوا في البحث عن المعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية لجاليليو، بأن الفضاء عديم الكيان. ولكن هذه الفترة لن تستمر طويلاً. فالتجربة – وهي الحَكَم النهائي – سوف تحكم ضد الفريق التقليدي. في مطلع القرن العشرين تبين من تجربة ميكلسون ومورلي أن التجارب التي تستخدم الضوء لا يمكنها هي الأخرى الكشف عن حركة منتظمة مطلقة.

على الرغم من ذلك، دعنا لا ننتظر تجربة ميكلسون ومورلي، ونعود بدلاً من ذلك إلى الأعضاء الباقين من فريق البحث الجذري الذين ساعدهم فضولهم الفكري في التغلب على الصدمة الأولى من إدراك ماهية كون رباعي الأبعاد. كما أنهم على وشك أن يتلقوا هدية غير متوقعة من زملائهم السابقين الذين انضموا إلى فريق البحث التقليدي. زار الباحثون الجذريون السابقون زملاءهم من فريق البحث الجذري وأخبروهم عن شكوكهم في أن وجود القصور الذاتي قد يكون مظهرا من مظاهر عدم وجود حركة منتظمة مطلقة. لقد أبلغوا الباحثين الجذريين الذين يميلون إلى اعتقاد الفريق التقليدي أن القصور الذاتي هو ما يمنعنا من الكشف عن حركة منتظمة للأجسام في الفضاء. لم يستغرق الباحثون الجذريون الحاليون والسابقون وقتًا طويلاً قبل أن يعلنوا أن هذا التفسير غير وارد ولا مجال للبحث فيه، وذلك لسببين على الأقل. الأول، هو أنهم لم يصدقوا أن الطبيعة تتآمر ضدنا عن طريق اختراع القصور الذاتي لمَنْعِنا من اكتشاف حركة منتظمة في الفضاء. هذا الفريق مقتنع بأنه إذا كان الشيء موجودًا فينبغي أن يكون قابلاً للكشف من حيث المبدأ. ومن ثم، إذا وُجدت حركة منتظمة مطلقة فمن الحتمي أن يكون باستطاعتنا الكشف عنها. وهذا هو السبب في أنه من غير المرجح بالنسبة لهم أن يخفي القصور الذاتي حركة منتظمة مطلقة؛ ويعتقدون على العكس

من ذلك أن القصور الذاتي ينتج من حقيقة أنه لا وجود لتلك الحركة.(*) السبب الثاني هو أن وجود القصور الذاتي لا يمكنه معالجة المفارقة التي واجهها فريق البحث التقليدي، لماذا يستحيل القول بأن جسمًا ما، يتحرك بانتظام في الفضاء، يتحرك *بالنسبة إلى* الفضاء أيضًا؟

ولأن القصور الذاتي لا يفسر المحاولات غير الناجحة للكشف عن حركة منتظمة مطلقة بواسطة تجارب ميكانيكية، فإنه ينتج من ذلك أنه إذا وجدت تلك الحركة فمن الحتمي أن تكتشف حتى باستخدام نوعية التجارب التي أجراها جاليليو. يوفر هذا الاستنتاج دعما قويًا ومستقلاً للتفسير الثاني للمعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية لجاليليو – إنه لا وجود لحركة منتظمة مطلقة – ويجعل أعضاء فريق البحث الجذري أكثر يقينًا من ذي قبل بأن الاتجاه الذي اتبعوه سوف يوصلهم للحقيقة. يمكنهم العودة الآن إلى الأسئلة المُقلقة التي طرحها الاستنتاج الذي توصلوا إليه بأن الكون رباعي الأبعاد. بطبيعة الحال، سوف يستغرقون بعض الوقت للتفكير في ماهية الواقع ويدركون أن الرؤية المربكة للكون، التي تنتج من التفسير الثاني لمبدأ النسبية لجاليليو والذي ينكر وجود حركة منتظمة مطلقة، تذكّر بالرؤية الإليائية، التي تقضي بأن الواقع الحقيقي وجود أبدي. الخطوة التالية للفريق الجذري تقليدية تمامًا. فهم يرغبون في معرفة ما إذا كانت الرؤية البعدية الرباعية تتناقض مع خبرتنا المستندة إلى حقيقة أن ما ندركه هو صور ثلاثية الأبعاد(**) للكون الخارجي. ويبين تحليلهم بشكل واضح أن إدراكنا له تفسيران محتملان: إما أن الصور ثلاثية الأبعاد التي ندركها تكون بسبب كون خارجي ثلاثي الأبعاد، أو أنها صور ثلاثية الأبعاد لكون متعدد الأبعاد.

(*) كما سنرى في الفصلين الرابع والتاسع، يبدو بالفعل أن هذا هو الحال، جوهر الوجود للقصور الذاتي لجسم ما (متحرك بسرعة منتظمة من تلقاء نفسه ويقاوم تسارعه) هو في الغالب مظهر لبُعْدِيَّة الكون الرباعية.

(**) في الحقيقة نحن ندرك صورًا ثنائية الأبعاد يتم معالَجتها بالمخ لكي تصبح ثلاثية الأبعاد.

بمجرد أن يدرك فريق البحث الجذري هـذين التفـسيرين المحتملـين لخبرتنا الحسية، يصبح من المؤكد أن الرؤية البعدية الرباعية سوف تتنـاقض مع خبرتنا فقط إذا تمكنا من توفير دليل على أن التفسير الثاني لمـا ندركـه خاطئ. بعد مناقشة حادة، لم يفشل فقط باحثو الفريق في إيجاد ذلـك الـدليل، ولكنهم يتوصلون إلى استنتاج أن ما كانوا يفعلونه منذ بداية تحلـيلهم لمبـدأ النسبية لجاليليو قد يوفر برهاناً لذلك التفسير. الآن لا شيء يمكن أن يمـنعهم من إدراك أكثر الأفكار أهمية لنظرية النسبية. بمجرد اكتشافهم أن التـزامن ليس مطلقاً، يكتشفون ما هو معناه الفيزيائي ويخلصون إلـى أنـه، بوجـود مجموعات مختلفة من الأحداث المتزامنة، سوف يكون لدى مراقبان مختلفان في حالة حركة نسبية أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد، وهو ما يكون ممكناً فقـط إذا كان الواقع هو كون رباعي الأبعاد. (إذا ما كان الواقع هو كـون ثلاثـي الأبعاد، لكان هناك فضاء واحد فقط ثلاثي الأبعاد). إذاً يمكن الحصول علـى جميع نتائج نظرية النسبية بسهولة كما سنرى في الفصل التالي.

٣,٢ عن مسلمتي النسبية الخاصة

إذا ما نظرنا إلى مسار الفريق الجذري في الصياغة رباعيـة الأبعـاد للنسبية، سوف نرى أنها أكثر قوة، واتساقاً، وإقناعًا من تلـك المُقَدَّمـة فـي الصياغة النموذجية لنظرية النسبية. دعنا نبدأ بالمسلمتين الأصـليتين اللتـين وضعهما آينشتين في ورقته البحثية عام ١٩٠٥ [١٤]:

توحي أمثلة من هذا النوع، بالإضافة إلى المحـاولات الغيـر ناجحـة لاكتشاف أي حركة للكرة الأرضية بالنسبة إلى "الوسط الخفيف"، بأن ظواهر الديناميكا الكهربية، مثلها مثل ظواهر الميكانيكا، لا تمتلك أي خواص تنـاظر فكرة السكون المطلق. وتشير بدلاً من ذلك، كما اتضح بالفعل حتـى الرتبـة الأولى من الكميات الصغيرة، إلى أن نفـس قـوانين الـديناميكا الكهربيـة

والبصريات ستكون سارية لجميع أُطر الإسناد التي تكون قوانين الميكانيكا فيها صالحة بشكل جيد. سوف نرقى بهذا الحدس (فحوى ما سوف نسميه من الآن فصاعدًا "مبدأ النسبية") إلى مرتبة مسلَّمة، ونقدم أيضًا مسلَّمة أخرى تكون ظاهريًا فقط متضاربة مع السابقة، وتقضي تحديدًا بأن الضوء ينتشر دائما في الفضاء الفارغ بسرعة محدودة c لا تعتمد على حالة حركة الجسم الباعث. تكفي هاتان المسلمتان لتحقيق نظرية بسيطة ومتسقة للديناميكا الكهربية بالنسبة لحركة الأجسام على أساس نظرية ماكسويل للأجسام الثابتة. سوف يَثْبُت عدم ضرورة إدخال مفهوم "الأثير المضيء" نظرًا لعدم احتياج الرأي الذي سيتم تطويره هنا إلى "فضاء مطلق الثبات" مزود بسمات خاصة، أو إلى تخصيص متجه سرعة لنقطة من نقط الفضاء الفارغ التي تحدث فيها عمليات كهرومغناطيسية.

افترض آينشتين فقط أن فكرة الفضاء المطلق لم تكن ضرورية للنظرية الجديدة. نتيجة لذلك، اعتبرت أي أسئلة حول الحركة المنتظمة المطلقة والسكون المطلق أنها بلا معنى. لم يجب آينشتين على السؤال الأساسي، وهو *لماذا* لا يوجد فضاء مطلق، وبالتالي لا توجد حركة منتظمة مطلقة ولا سكون مطلق؟ ولكنه على الأقل ذكر صراحة أن النسبية الخاصة لم تكن بحاجة إلى فضاء مطلق. في هذا الصدد لم يتغير الوضع في عروض النسبية الخاصة التي جاءت بعد آينشتين. خذ على سبيل المثال صيغة نموذجية لمسلمتي النسبية الخاصة (انظر على سبيل المثال [١٦، ١٧، ١٨، ١٩، ٢٠]):

- قوانين الفيزياء تظل كما هي في جميع أُطر الإسناد القصورية.
- سرعة الضوء في الفراغ (c) تظل كما هي في جميع الأُطر القصورية.

لا توجد كلمة واحدة عن استحالة الكشف عن الحركة المنتظمة لجسم في الفضاء. أعتقد أنه ينبغي تناول هذا السؤال صراحةً في مسلمتي النسبية الخاصة نظرا لأننا جميعًا نرى أن الأجسام تتحرك في الفضاء. إذًا يظل السؤال صحيحًا عن سبب استطاعتنا القول بأن جسمًا ما يتحرك في الفضاء، وليس بالنسبة إلى الفضاء. في الحقيقة، تقول المسلمة الأولى في الأساس، والتي يطلق عليها أحيانًا المبدأ المعمم للنسبية، أن الحركة المنتظمة المطلقة لا يمكن اكتشافها بواسطة أي تجربة. وهذا هو السبب في أن شكل قوانين الفيزياء يظل كما هو في جميع أُطر الإسناد القصورية؛ وإلا، إذا اكتشف مراقب أن شكل قانون ما كان مختلفًا في إطار إسناده القصوري فإنه قد يكون باستطاعته زعم أنه قد اكتشف حركته المنتظمة المطلقة.

لاحظ أن المسلمة الأولى تنصُ صراحة على أن الحركة المنتظمة المطلقة لا يمكن اكتشافها، بصرف النظر عن أي نوعيات من التجارب قد أجريت. ويتم هذا على أساس نوعين فقط من التجارب – ميكانيكية وكهرومغناطيسية. ولكن ماذا عن الأنواع الأخرى من التجارب المشتملة، مثلاً، على تآثرات ضعيفة وقوية؟ صحيح أن لدينا أسبابًا قوية للاعتقاد بأن أي تجربة لن تسفر عن نتائج. ولكن المهم هو أننا لا نعلم لماذا لا يمكن الكشف عن الحركة المنتظمة المطلقة، ولهذا السبب لا يمكن التأكد من أن مثل هذا الكشف مستحيل *من حيث المبدأ*.

على النقيض من ذلك، وجه أعضاء فريق البحث الجذري مباشرة أسئلة عن فضاء مطلق وحركة منتظمة مطلقة. لقد فسروا مبدأ النسبية لجاليليو عن طريق الفرض صراحة بأنه *لا* وجود لحركة منتظمة مطلقة. حاول أعضاء هذا الفريق فهم الحقيقة التجريبية التي تفيد بأن الحركة المنتظمة الواضحة لسفينة في الماء، وفي الهواء، بل وفي الفضاء أيضًا لم

يمكن الكشف عنها بواسطة تجارب ميكانيكية. لقد اقتنعوا بأنه ينبغي أن يكون هناك تفسير لهذه الحقيقة. وقد قادهم تحليلهم بالفعل إلى استنتاج أن الحركة المنتظمة في الفضاء لم يمكن الكشف عنها لأن هناك المزيد من الأفضية، مما يعني أن الحركة المنتظمة المطلقة غير موجودة.

بمجرد استنتاج أن الحركة المنتظمة المطلقة غير موجودة، ينتج على الفور أنه مهما كانت نوعية التجارب التي يجريها الشخص، فلن تسفر أي منها عن نتيجة،لا يمكن لأحد أن يكتشف ما هو غير موجود. ذلك هو السبب في أن مسلمة ما تنص صراحة على أنه لا وجود للحركة المنتظمة المطلقة (اعتمادًا على الدليل التجريبي بأن تلك الحركة لا يمكن اكتشافها) تكون أقوى من تلك التي تسمى المبدأ المعمم للنسبية. بل إن المسلمة الأكثر قوة هي تلك التي قُدِّمت في صياغة مينكوفسكي للنسبية الخاصة – أن الكون رباعي الأبعاد. وبالفعل، كما رأينا، المعنى الفيزيائي المتعمق لعدم وجود حركة منتظمة مطلقة هو أن الكون رباعي الأبعاد، مما يعني، بدلالة لغتنا العادية ثلاثية الأبعاد، أن المراقبين الذين يكونون في حالة حركة نسبية لديهم أكوان مختلفة ثلاثية الأبعاد تكوِّن مقاطع عرضية ثلاثية الأبعاد من هذا الكون رباعي الأبعاد.

النتيجة المباشرة الأخرى لتفسير مبدأ النسبية لجاليليو الذي يقضي بأنه لا وجود لحركة منتظمة مطلقة هي ثبات مقدار سرعة الضوء – يجب أن يكون مقدار سرعة الضوء كما هو في جميع أُطر الإسناد القصورية – لأنه إذا لم يكن كذلك فقد تُكتَشف حركة منتظمة مطلقة كما رأينا في مناقشة التجربة الفكرية المبينة في شكل ٣,٦. وبذلك فإن طريقة استكشاف المنطق الداخلي للأفكار الأساسية التي اتبعها فريق البحث الجذري أسفرت عن أن ثبات مقدار سرعة الضوء هو نتيجة لمبدأ النسبية وليس مسلمة مستقلة بذاتها. ميزة

واضحة أخرى لهذه الطريقة هي قدرتها على تحصيل نتائج أساسية رائدة مثل الاستنتاج المدهش الذي يقضي بأن عدم وجود حركة منتظمة مطلقة يتطلب وجود أفضية متعددة ثلاثية الأبعاد، وبالتالي وجود كون رباعي الأبعاد.

حقيقة أن المراقبين الموجودين في حالة حركة نسبية يكون لديهم أفضية متعددة ثلاثية الأبعاد لم تُذكر صراحة في العروض النموذجية للنسبية الخاصة. لاحظ مينكوفسكي في عام ١٩٠٨ أنه [١١، ص ٨٣]: "لم يشنّ آينشتين أو حتى لورنتز أي هجوم على مفهوم الفضاء." كان مينكوفسكي هو أول من أشار إلى أن فكرة أفضية عديدة أمر لا مفر منه للفهم الحقيقي لنظرية النسبية الخاصة [١١، ص ص ٧٩-٨٠]:

يجب إذًا ألا يكون لدينا فضاء في الكون بعد الآن، ولكن عددًا لا نهائيًا من الأفضية، تماثلاً مع وجود عدد لا نهائي من المستويات في فضاء ثلاثي الأبعاد. تصبح الهندسة ثلاثية الأبعاد فصلاً في الفيزياء رباعية الأبعاد. الآن تعرف لماذا قلتُ في البداية إن المكان والزمان سوف يتلاشيان إلى ظلال، ولن يبقى غير الكون نفسه.

للأسف، لا يبدو أن تحليل منكوفسكي قد حظي بتقدير تام. مثل تلك النزعة مؤكدة حتى في ملاحظات سمرفيلد على ورقة منكوفسكي البحثية [١٥]:

ماذا سيكون عليه الموقف المعرفي نحو تصور مينكوفسكي لمشكلة الزمان، المكان هو سؤال آخر، ولكن، كما يبدو لي، هو سؤال لا يمس جوهر الفيزياء الخاصة به.

إحدى النتائج الرئيسية للطريقة التي استخدمها فريق البحث الجذري هي إدراك أن النسبية الخاصة متضمَّنة *بشكل منطقي* في مبدأ النسبية لجاليليو. ذلك لأن هذا المبدأ، كما رأينا، له من حيث المنطق تفسيران فقط يؤدي

أحدهما مباشرة إلى الأفكار الأساسية لنظرية النسبية وإلى صياغتها الرياضياتية، كما سنرى في الفصل التالي. الفرضية الإضافية الوحيدة التي استُخدِمَت هي الحقيقة التجريبية التي تفيد بأن مقدار سرعة الضوء محدود.

٣,٣ درس من اكتشاف مُتأَخِّر

إن إدراك أن صياغة مينكوفسكي رباعية الأبعاد للنسبية الخاصة متَضمَّنة بشكل منطقي في مبدأ النسبية لجاليليو يؤدي بطبيعة الحال إلى السؤال عن احتمالية أن تكون النسبية الخاصة قد اكتُشِفَت في وقت سابق. أنا لا أنوي التكهن بشأن متى يمكن أن يكون هذا قد حدث. ولكن أتمنى أن يكون هذا الفصل قد أقنعك بأن النسبية الخاصة هي بالفعل اكتشاف متأخر. عندئذ يكون السؤال التالي الذي لا يمكن تجنبه هو: هل تتأخر أيضًا اكتشافات مستقبلية؟

يمكن للمرء أن يصل إلى وجهتي نظر حول السبب في عدم وجود قفزات حديثة (من نوعية النسبية الخاصة والعامة وميكانيكا الكم) في مجال العلوم الأساسية، هما:

- لا يوجد دليل تجريبي كافٍ لجعل قفزة التقدم ممكنة.
- كل الظروف الضرورية لنظرية فيزيائية جديدة، على سبيل المثال، متوفرة، ولكن الباحثين كانوا يفشلون في المعالجة الناجحة للأدلة النظرية والتجريبية الموجودة.

يبين التحليل في هذا الفصل أن الاحتمال الثاني لا يمكن إقصاؤه. من الوهلة الأولى، ينبغي ألا يكون هذا سببًا للقلق. وفي كثير من الأحوال تكون الاكتشافات المتأخرة هي مجرد اكتشافات متأخرة لا أكثر. ولكن ما يدعو للقلق، هو أنه في بعض الحالات القصوى قد تتحول القفزات المتأخرة في

علمي الأحياء والفيزياء، على سبيل المثال، إلى أن تهدد جوهر الوجود للجنس البشري بأكمله.(*)

في محاولة للحد من احتمالات تأخر الاكتشافات المستقبلية، علينا أن نجد وسيلة لجعل السعي من أجل المعرفة العلمية أكثر فعالية من خلال تطوير إستراتيجيات البحث وتثقيف جيل جديد من الباحثين المبدعين. كخطوة مفيدة في هذا الاتجاه، ربما تكون دورة جامعية إجبارية في إطار التنمية الدولية عن استكشاف المنطق الداخلي للأفكار الأساسية بمثابة طريق أقصر نحو أفكار جديدة واكتشافات علمية. يمكن تطوير إصدارات من تلك الدورة بواسطة عُلماء يعملون في مجالات مختلفة، ويمكنهم أن يوفروا دراسات حالة للاكتشافات التي تمت مؤخرًا في مجالهم.

٣,٤ ملخص

فحصنا في هذا الفصل المعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية لجاليليو، ووصلنا إلى استنتاج مفاده أن انعدام النتيجة في تجارب جاليليو يقتضي ضمناً أن الحركة المنتظمة المطلقة غير موجودة. أوضح تحليلنا أن عدم وجود حركة منتظمة مطلقة يستوجب وجود المزيد من الأفضية ثلاثية الأبعاد التي تكون بدورها ممكنة فقط في كون رباعي الأبعاد. تبرهن نتائج هذا التحليل على أن الصياغة رباعية الأبعاد للنسبية الخاصة مُتَضَمَّنة بشكل منطقي في مبدأ النسبية لجاليليو.

(*) ليس من المستحيل أن نتصور وجود نظام كوكبي متجول في مسار تصادمي مع نظامنا الشمسي. علينا إما قبول مصيرنا والاستعداد الروحي للرحيل إلى الفناء أو الشروع في مشروع بحثي يائس لدراسة آلية القصور الذاتي والثقالة على أمل أن نتمكن من تعلم كيفية السيطرة عليهما. وإحراز نجاح ما يمكن أن يسمح لنا بأخذ الأرض معنا وترك نظامنا الشمسي المنكوب؛ على الأرجح لن يشكل إطلاق "شموس" محلية في مدار فوق الأرض تحدياً مثل الذي يشكله تحويل الأرض إلى سفينة فضائية ضخمة. من الواضح، في مثل هذه الحالة إما أن يتم الاكتشاف في الوقت المناسب أو لن يكون هناك أي اكتشاف متأخر. يبدو أن هناك سيناريو آخر ليوم القيامة أكثر احتمالا يتعلق بعلم الوراثة.

الفصل الرابع

النسبية في الفضاء الإقليدي وفي الزمكان

يُعتقد أن الكون بأكمله يحلل نفسه إلى خطوط كونية، وأجد نفسي راضيًا بالقول – فيما أرى – بأن القوانين الفيزيائية ربما تجد صياغتها بالغة الإتقان في صورة علاقات تبادلية بين هذه الخطوط الكونية.

هـ. مينكوفسكي [١١، ص ٧٦]

لا يوجد ديناميكا داخل الزمكان نفسه: لا شيء يتحرك في الداخل أبدًا؛ لا شيء يحدث، لا شيء يتغير [...] لا يفكر أحد في الجسيمات على أنها "متحركة خلال" الزمكان، أو أنها "متتبعة مسار" خطوطها الكونية. والأحرى أن الجسيمات تكون فقط "داخل" الزمكان، مرة واحدة وإلى الأبد، ويمثل الخط الكوني، في وقت واحد، التاريخ الكامل لحياة الجسيم.

ر. جيروش [٢١]

كما رأينا في الفصل الثالث، أكثر نتيجة مضطربة لتحليل مبدأ النسبية لجاليليو الذي أجراه فريق البحث الجذري هي أن الكون رباعي الأبعاد. ولكن حتى الآن لم تواجه نتائج تحليلاتهم أي تناقض واضح مباشرة مع الأدلة التجريبية الحالية. من الطبيعي لباحثي هذا الفريق أن يرغبوا في هذه المرحلة في إعلام المجتمع العلمي بنتائجهم الرائدة. ورغم أنهم على دراية تامة بمدى صعوبة تلك المهمة، فإنهم يعرفون أن أفضل وسيلة لإقناع المجتمع العلمي المتشكك والمحافظ هي السماح للحكم النهائي – الدليل التجريبي – بأن يقوم بهذه المهمة بدلاً منهم. وبالتالي بدءوا في العمل على صياغة رياضياتية تصف الفضاء رباعي الأبعاد متضمنًا الزمن على أنه البعد الرابع.

مرة أخرى، يتبع فريق البحث الجذري أفضل إستراتيجية في أوقات الأزمات، عندما يؤدي شيء بالغ الوضوح – مثل الحركة المطلقة – إلى تناقضات، لا سيما مع الأدلة التجريبية: فيحاولون تجاهل الاحتجاجات من إحساسهم الفطري، ويتتبعون فقط المنطق الداخلي لفكرة أن الحركة المطلقة غير موجودة. إنهم يعرفون أنهم قد يكونوا على خطأ، ولكنهم يعتقدون اعتقادًا راسخا أنه يجدر معرفة التوقعات التي ستؤدي إليها تلك الفكرة. وكما هو الحال دائما، ستكون التجربة هي صاحبة الكلمة الأخيرة.

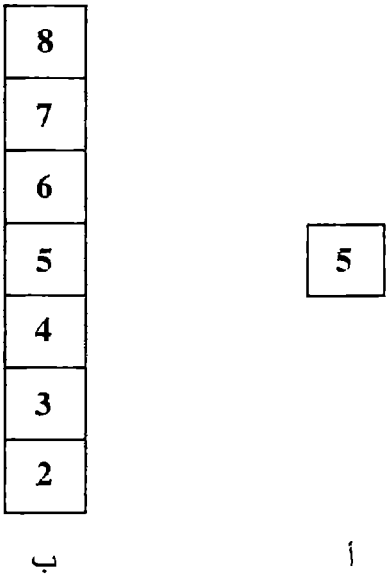
٤,١ الزمكان

الخطوة الأولى نحو الوصف الرياضياتي للفضاء رباعي الأبعاد هي تحديد التناظر بين الأجسام الهندسية والفيزيائية. وحيث إن الاسم الذي سوف نعطيه للفضاء رباعي الأبعاد ليس ذا أهمية، فدعنا نستخدم التعبير الحالي "الزمكان أو زمكان مينكوفسكي" أسماه مينكوفسكي نفسه الكون. سوف نشير إلى نقط الزمكان بنقط الكون أو الأحداث. وبما أن الحدث يتحدد بأربعة أعداد، ثلاثة منها تحدد موقعه في الفضاء بينما يخبرنا الرابع بلحظة وقوع الحدث، فمن المهم أن ندرك أن مفهوم الحدث هو العنصر الأساسي للزمكان، وأن معناه هنا يختلف عن معناه المعتاد. يُعَرَّف حجر البناء للزمكان – الحدث – على أنه جسم ثلاثي الأبعاد، نقطة مجال، أو نقطة فضاء عند لحظة معينة من الزمن. يصبح هذا التعريف واضحا إذا ما أخذنا بعين الاعتبار حقيقة أن البعد الرابع من الزمكان – بُعد الزمن – يُعطى تماما مثل الأبعاد الثلاثة المكانية. خلافا لذلك، إذا لم يُحدَد الزمكان دفعة واحدة، فلن تكون هناك أي وسيلة لكي يصبح رباعي الأبعاد. مع وضع ذلك في الاعتبار لن يكون من الصعب جدا إدراك أن التاريخ الكامل لكل جسم فيزيائي يُحدَد تمامًا في الزمكان بجسم رباعي الأبعاد. إذا كان الجسم الفيزيائي جسيمًا صغيرًا أشبه بنقطة، يكون ذلك الجسم رباعي الأبعاد مجرد خط(*) في

(*) إدراك أن جسيمًا ما هو خط في فضاء رباعي الأبعاد لا يتطلب أي معلومات حديثة. في عام ١٨٨٤ أوضح س. هـ. هينتون كيف أن الجسيمات العادية ستكون خيوطا في فضاء رباعي الأبعاد [٢٢، ٢٣]

الزمكان يسمى الخط الكوني. وبما أن الخط الكوني لجسيم يتكون من أحداث، فإن كل حدث هو الجسيم عند لحظة زمنية معينة من تاريخه.

سوف يتغلب فريق البحث الجذري على إغراء اعتبار خط الجسيم الكوني مماثلاً لمسار الجسيم. لا يمكن اعتبار الخط الكوني على أنه خط لحدث واحد فقط يحوي الجسيم، بينما تكون الأحداث الأخرى جميعها فارغة. إذا كان هذا هو الحال، لما كان الخط الكوني خطًا في الزمكان وإنما سيُختزل إلى مجرد حدث واحد، الحدث الذي يحوي الجسيم. لإيضاح سبب ذلك، اعتبر ساعة رقمية بدلاً من جسيم. بما أنها جسم ممتد مكانيًا، فإنها ستكون أنبوبًا كونيًا في الزمكان.



شكل ٤,١ (أ) ساعة رقمية موجودة فقط عند اللحظة الحاضرة. **(ب)** خط كوني لساعة رقمية في الزمكان.

يصور شكل ٤,١ (أ) المنظر المعتاد لساعة رقمية – الساعة موجودة كجسم ثلاثي الأبعاد فقط عند لحظة "الآن"، ولتكن عند الثانية الخامسة. يبين شكل ٤,١ ب الساعة الرقمية في الزمكان – يتكون أنبوبها الكوني من الساعة في جميع *لحظات* تاريخها(*). واضح من شكل ٤,١ ب أن الأنبوب الكوني للساعة لا يمكن النظر إليه على أنه يتكون من حدث واحد(**) يحوي الساعة ثلاثية الأبعاد في لحظتها الحاضرة (الثانية الخامسة) وتكون الأحداث الأخرى جميعها فارغة. من المهم أن ندرك تماما أن الأنبوب الكوني للساعة الرقمية هو كيان رباعي الأبعاد في الزمكان. هذا يعني أن كل الأحداث التي تشكل الأنبوب الكوني للساعة تحوي ساعة مختلفة ثلاثية الأبعاد عند كل لحظة معينة من تاريخها. إذا احتوى الأنبوب الكوني على ساعة ثلاثية الأبعاد واحدة فقط –تبين الثانية الخامسة الحالية – فلن يكون الأنبوب الكوني للساعة رباعي الأبعاد، وبالتالي لن يوجد أي أنبوب كوني على الإطلاق: وما يُصَور في شكل ٤,١ أ و ب هو ساعتان متماثلتان ثلاثيتا الأبعاد موجودتان عند الثانية الخامسة.

يشرح شكل ٤,١ ب بوضوح السبب في أن يكون حدث ما مصاحب لجسم فيزيائي هو الجسم ثلاثي الأبعاد عند لحظة معينة من تاريخه. لهذا يجب أن يكون المرء حريصًا على ألا يخلط بين المعنى المعتاد لمفهوم "الحدث" وبين معناه كعنصر في الزمكان. على سبيل المثال، إنه لتناقض من حيث التفكير في أن الأحداث المختلفة تقع مع نفس الجسم ثلاثي الأبعاد لأن الأحداث المختلفة، كما هو مبين في الشكل ٤,١ ب، هي ساعات مختلفة ثلاثية الأبعاد توجد في اللحظات المختلفة من تاريخ الساعة.

(*) ما هو مبين في الشكل ليس دقيقًا جدا من ناحية واحدة، وهي...، وهي أن شاشات الساعات ممتدة في البعد الرابع، وما ينبغي هو أن تكون الساعات ثلاثية الأبعاد ممثلة بخطوط أفقية فقط.

(**) في حالة الأجسام الممتدة مكانيًا تكون الأحداث المصاحبة لهذه الأجسام ممتدة هي الأخرى في الأبعاد المكانية، ولكن ليس في البعد الزمني.

أيٌّ المنظرين الممثلين في شكلي ٤,١ أ و ب يناظر الكون الواقعي هو سؤال منفصل وهو، في هذه المرحلة من تحليل فريق البحث الجذري، سؤال مفتوح. على الرغم من ذلك، سوف نرى في الفصل الخامس أنه إذا لم تكن أنابيب الكون للأجسام الفيزيائية المتضمّنة في تلك التأثيرات كيانات واقعية رباعية الأبعاد لما كانت النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة ممكنة.

جزء آخر مهم من المعلومات يمكن استنتاجه من شكل ٤,١ ب، وهو أن طول الأنبوب الكوني للساعة يعطي الزمن. الطول بين أي حدثين عليه هو فترة زمنية. الأنبوب الكوني لأي جسم معرض لتغير دوري يشبه مسطرة. لهذا يمكن اعتبار الأنبوب الكوني لساعة ما بمثابة *مسطرة زمنية* في الزمكان.

بعد أن أوضحنا المقصود بمفهوم "الحدث" في الزمكان، دعنا الآن نستمر في استخدام الخطوط الكونية بدلاً من أنابيب الكون. يمكن استخدام الخط الكوني لأي جسم فيزيائي متحرك بانتظام على أنه محور الزمن لإطار إسناد قصوري مصاحب لهذا الجسم. إدخال إطار إسناد قصوري في الزمكان يسمح لنا أن نتحدث عن المكان والزمان لأننا اخترنا اتجاه الزمن على طول الخط الكوني لجسم يتحرك بانتظام، ويمكننا اختيار الفضاء ثلاثي الأبعاد بحيث يكون متعامدًا مع الخط الكوني للجسم. على الرغم من ذلك، لا يدل هذا على أن الزمكان نفسه منقسم إلى زمان ومكان. نحن أحرار في اختيار اتجاه آخر للزمن وفضاء آخر ثلاثي الأبعاد متعامد مع ذلك الاتجاه. . نحن أحرار أيضًا في اختيار الفضاء ثلاثي الأبعاد بحيث لا يصنع زاوية قائمة مع اتجاه الزمن الذي تم اختياره. إن الموقف في الزمكان مشابه لرسم محور x ومحور y على مستوى. يمكننا اختيار أي اتجاهات للمحورين. يمكننا أيضًا اختيار نظام إحداثيات غير متعامدة يكون فيه محور x غير متعامد مع y. الفرق الوحيد بين الهندسة الإقليدية وهندسة الزمكان هو أنه لا يمكننا في

الزمكان اختيار محور الزمن لإطار إسناد قصوري في أي اتجاه. كما سنرى بعد قليل، الحقيقة الراسخة بأن البعد الزمني مختلف عن الأبعاد الثلاثة المكانية للزمكان تفرض بعض القيود.

سوف يكون فريق البحث الجذري الآن في موقع يرون فيه كيف كان سيبدو موضوع الحركة المنتظمة في الزمكان، أو الأكثر تحديدًا، ما إذا كان باستطاعة فكرة الزمكان أن توفر بعض التبصر الإضافي حول *لماذا* لا توجد حركة منتظمة مطلقة. أدرك الباحثون من هذا الفريق بالفعل الثمن المقلق لفرضية عدم وجود الحركة المطلقة، تؤدي هذه الفرضية إلى فكرة الزمكان حيث لا توجد حركة على الإطلاق لأن جميع لحظات الزمن معطاة دفعة واحدة في البعد الزمني للزمكان. وبالفعل، إذا نظرنا بعين الاعتبار إلى الخط الكوني لجسيم في الزمكان، فإن الخط الكوني هو كيان متوحد رباعي الأبعاد أبدي الوجود في الكون المتجمد لزمكان مينكوفسكي. إذًا، في الزمكان، ما يعتقده فريق البحث الجذري هو الواقع الحقيقي، ولا توجد حركة على الإطلاق.

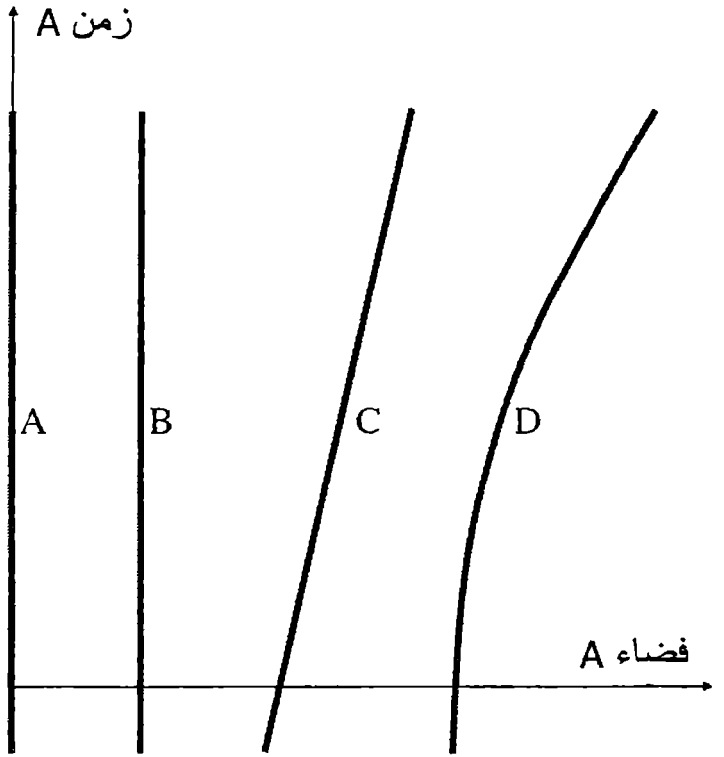
رغم ذلك، يعرف هذا الفريق جيدًا أنه مهما كانت نظرياتنا، يجب أن يُعَبَّر عنها بدلالات تعكس طريقتنا التي نتصور بها الكون. وبما أننا نتصور حركة الأجسام ثلاثية الأبعاد في الفضاء ثلاثي الأبعاد، فمن الواضح أنه، لكي نتكلم عن الحركة، يجب أن نضع إطار إسناد في الزمكان يُعرِّف اتجاه زمن وفضاء ثلاثي الأبعاد. يكون الجسيم الذي يقع خطه الكوني على طول محور الزمن لإطار الإسناد ساكنًا في فضائه الخاص ثلاثي الأبعاد. لا معنى لسؤال عما إذا كان الجسيم في حالة حركة منتظمة مطلقة، لأن هذا السؤال، كما رأينا في الفصل الثالث، يقتضي ضمنًا وجود فضاء ثلاثي الأبعاد *واحد* فقط، بينما نستطيع أن نضع عددًا لا نهائيًا من أُطر الإسناد في الزمكان، وبالتالي يمكن أن نُعَرِّف عددًا لا نهائيًا من أفضية ثلاثية الأبعاد هناك. لذا، عندما نقول إن الجسيم يتحرك *في* الفضاء، فليس من الضروري تحديد في أي

فضاء ثلاثي الأبعاد يتحرك لأنه يتحرك في جميع الأفضية المحتملة، فيما عدا فضائه الخاص. على الرغم من ذلك، واضح أن القول بأن الجسيم يتحرك *بالنسبة إلى* فضاء يتطلب منا أن نوضح بالنسبة لأي فضاء ثلاثي الأبعاد يتحرك؛ بمعنى آخر، يجب أن نحدد بالنسبة لأي جسيم يتحرك الجسيم الأول، لأن أي محور زمن مع فضاء ثلاثي الأبعاد يصاحبهما خط كوني لجسيم فيزيائي. بهذه الطريقة، شرط تحديد الجسيم الذي يتحرك بالنسبة له جسيم آخر يجيب في حقيقة الأمر على سؤالين في آن واحد:

- لماذا لا توجد حركة منتظمة مطلقة؟
- ما السبب في أنه لا معنى للكلام عن حركة نسبية فقط (عن حركة بالنسبة إلى جسم فيزيائي).

يجب التأكيد هنا مرة أخرى على أن الحركة المنتظمة المطلقة لن تكون موجودة فقط إذا كان الكون رباعي الأبعاد، حيث يمكن عنده تعريف أفضية متعددة ثلاثية الأبعاد.

يصور شكل ٤,٢ علاقات مختلفة بين الخطوط الكونية وحركات الجسيمات المناظرة. إطار الإسناد القصوري يكون مصاحبًا للخط الكوني للجسيم A – محور الزمن لإطار إسناد A على طول خط A الكوني (الذي يُحدد اتجاهًا ما في الزمكان) وفضاء A ثلاثي الأبعاد متعامد مع خط A الكوني. الخط الكوني لجسيم B يوازي خط A الكوني، مما يعني أن المسافة بين الجسيمين لا تتغير مع الزمن، وبالتالي فهما ساكنان بالنسبة لبعضهما. وبما أن الخطين الكونيين للجسيمين A وB متوازيان، فإنهما يُحددان نفس الاتجاه الزمني، وبالتالي لا يهم بأيهما يرتبط محور الإسناد قصوري، سوف يتقاسم كلا الجسيمين نفس الإطار وسيكون لديهما زمن مشترك وفضاء مشترك ثلاثي الأبعاد.



شكل ٤,٢ الخطوط الكونية لأربعة جسيمات. يحدد الخط الكوني لجسيم A محور الزمن والفضاء ثلاثي الأبعاد لإطار الإسناد القصوري المصاحب للجسيم A. أُزيل من الشكل اثنان من الأبعاد المكانية للجسيم A.

الخط الكوني للجسيم C يميل بالنسبة إلى خطي A وB الكونيين. هذا يعني أن C يتحرك بالنسبة إلى A (وB) لأن المسافة بينه وبين A تزيد مع الزمن. بصياغة أخرى، يتحرك C بانتظام في فضاء A؛ ولكن C لا يتحرك في فضائه الخاص ثلاثي الأبعاد الذي يكون متعامدًا مع خطه الكوني (لا يظهر في شكل ٤,٢). من السليم أيضًا القول بأن C يتحرك بالنسبة إلى فضاء A. وكما هو ظاهر في شكل ٤,٢، لكي نتكلم عن الحركة، يجب أن يكون هناك خطان

كونيان يصنعان زاوية ما. وبذلك، توجد علاقة بين السرعة النسبية بين جسيمين في الفضاء والزاوية بين خطيهما الكونيين في الزمكان. (سوف تُستنتج صيغة هذه العلاقة في القسم التالي.)

على خلاف الخطوط الكونية للجسيمات A، وB، وC في شكل ٤,٢، يكون الخط الكوني للجسيم D منحنيًا. بالنظر إلى طريقة تغير المسافة بين A وD مع الزمن، نصل بسهولة إلى استنتاج أن حركة D ليست منتظمة؛ وإنما متسارعة. توفر مقارنة الخطوط الكونية للجسيمات في الزمكان معيارًا موضوعيًا للتمييز بين الحركة المنتظمة (الحركة بسرعة ثابتة) والحركة المتسارعة: الخط الكوني لجسيم متحرك بانتظام هو خط مستقيم، بينما الخط الكوني لجسيم متسارع يكون منحنيًا.(*) التمييز الموضوعي بين خط كوني مستقيم وآخر منحنٍ يوحي للفريق الجذري بأنه يجب أن تكون هناك بعض الفيزياء وراء هذا التمييز. وبالفعل يحصلون على دلالة أخرى على أن نهجهم قد يكون هو النهج الصحيح – لا يمكن اكتشاف الحركة المنتظمة، بينما يمكن اكتشاف الحركة المتسارعة من داخل إطار إسناد متسارع بسبب وجود قوى قصورية هناك. أيضًا، كما سنرى في الفصل السابع، يمكن التمييز بين إطار إسناد لاقصوري، مصحوب بجسيم متسارع، وبين إطار إسناد قصوري،(**) مصحوب بجسيم يتحرك بسرعة ثابتة (أيْ بالقصور الذاتي)، بسبب لاتماثل انتشار الضوء اتجاهيًا في الإطار اللاقصوري.

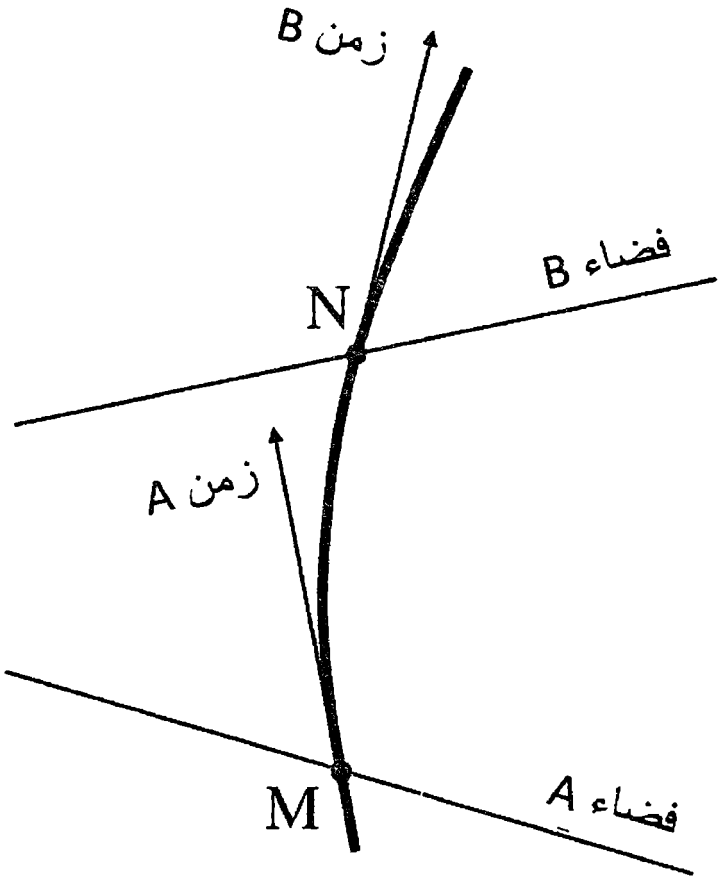
(*) يصلح هذا المعيار لزمكان مينكوفسكي المسطح. كما سنرى في الفصل السابع، يطبق معيار مشابه في حالة زمكانٍ منحنٍ أيضًا.

(**) من الآن فصاعدًا سوف نتبع التقليد المستقر وسوف نستخدم مراقبين قصوريين ومراقبين لاقصوريين كمرادفات لإطار إسناد قصوري و إطار إسناد لاقصوري، على التوالي.

قد يزعم الآن فريق البحث الجذري أن لديهم تفسيرًا لقابلية اكتشاف الحركة المتسارعة – تشوه الأنبوب الكوني لجسيم متسارع. على الرغم من ذلك، لا يزالون غير قادرين على تفسير طبيعة التأثيرات القصورية التي تجعل الحركة المتسارعة قابلة للكشف. ولكنهم سيدركون قريبًا أنه إذا كانت أنابيب الكون هي أجسام واقعية رباعية الأبعاد، وحيث إن الأنبوب الكوني لجسيم متسارع (يقاوم تسارعه من خلال قوة قصورية تؤثر عليه) يكون منحنيًا، فإنه من الطبيعي إلى حد كبير أن ننظر إلى القوة القصورية على أنها تنبثق من إجهاد رباعي الأبعاد في الأنبوب الكوني للجسيم الذي ينشأ عندما يتشوه الأنبوب الكوني. سوف نناقش هذا السؤال في الفصل التاسع.

حقيقة أن الحركة المتسارعة لجسيم يمكن اكتشافها من داخل إطار الإسناد اللاقصوري الذي يكون فيه الجسيم ساكنًا، توضح أن الحركة المتسارعة تكون مطلقة على عكس الحركة المنتظمة. على الرغم من ذلك، يجب الإشارة إلى أن كلمة "مطلق" تعني القابلية للكشف، وليس حركة بالنسبة إلى فضاء مطلق. في الغالب يُفهَم وجود التسارع المطلق على أنه يقتضي ضمنًا وجود الفضاء المطلق [٢٤]: "بمعلومية تعريف التسارع المطلق، تحديدًا على أنه التسارع بالنسبة إلى فضاء مطلق، يكون التسارع ممكنًا فقط إذا كان الفضاء المطلق موجودًا." إلا أنه يتضح من المناقشة في الفصل الثالث أن عدم وجود الفضاء المطلق لا يغير حقيقة أن الحركة المتسارعة قابلة للكشف وبهذا المعنى تكون مطلقة. وبدلالة الحركة بالنسبة إلى فضاء، يكون التسارع مطلقًا بمعنى أنه إذا كان الأنبوب الكوني لجسيم منحنيًا، فإن الجسيم يتسارع في جميع أُطر الإسناد القصورية، أي بالنسبة *لجميع* الأفضية ثلاثية الأبعاد. للمقارنة، الحركة المنتظمة ليست مطلقة لأن الجسيم المتحرك بانتظام لا يتحرك بالنسبة إلى الأفضية ثلاثية الأبعاد لجميع أُطر الإسناد القصورية،

حيث إنه يكون ساكنًا في فضاء إطاره الإسنادي القصوري. قد يعترض أحد على أن الجسيم المتسارع يكون أيضًا ساكنًا في فضائه الخاص. رغم ذلك، وبخلاف الجسيم المتحرك بانتظام، ليس لدى الجسيم المتسارع فضاء خاص به. الجسيم المتحرك بالقصور الذاتي (بمقدار سرعة منتظم) لديه فضاؤه الخاص، بمعنى أن الخط الكوني المستقيم للجسيم يحدد اتجاهًا زمنيًا ما ويتم، كما جرى العرف، اختيار أفضيته المناظرة للحظات مختلفة من الزمن بحيث تكون عمودية على نفس الاتجاه الزمني هذا. كما هو مبين في شكل ٤,٣، لا يحدد الخط الكوني المنحني لجسيم متسارع اتجاهًا زمنيًا معيناً. يكون لدى الجسيم في أي لحظة من تاريخه اتجاهات زمنية مختلفة محددة بخطوط المماس عند اللحظات المختلفة. هذا يعني أنه عند أي لحظة يرتبط إطار إسناد قصوري مختلف مصحوبًا بالجسيم المتسارع الذي يكون محوره الزمني على طول الاتجاه الزمني لهذه النقطة. ولأن الفضاء عمودي على اتجاه الزمن فسيكون لدى الجسيم اتجاهات زمنية مختلفة وأفضية مختلفة في كل لحظة خلال الزمن الذي يتسارع فيه. من الناحية الفيزيائية، هذا يعني أن الجسيم، عند أي لحظة خلال تسارعه، يكون ساكنًا لحظيًا بالنسبة لجسيم مختلف يتحرك بانتظام، ويتقاسم الجسيمان لحظيًا نفس إطار الإسناد القصوري، وبالتالي نفس الزمن ونفس الفضاء. يتطابق لحظيًا في شكل ٤,٣ محور الزمن لإطاري الإسناد القصوريين لمراقبَين A وB متحركين نسبيًا مع الاتجاهين الزمنيين المحددين بخطي المماس للخط الكوني للجسيم المتسارع عند الحدثين M وN (سوف نرى لاحقًا في هذا الفصل لماذا لا يكون الخطان اللذان يمثلان فضاء A وفضاء B متعامدين مع محوري زمن A وB، على التوالي). يسمى إطارا الإسناد القصوريان للمراقبَين A وB بإطار الإسناد القصوري اللحظي أو المتحرك بالتلازم عند الحدثين M وN.



شكل ٤,٣ بما أن الخط الكوني لجسيم متسارع يكون منحنيًا، فإنه عند أي لحظة من زمن الجسيم، يُحدد المماس لخطه الكوني اتجاهًا زمنيًا ما. هذا يعني أن الجسيم المتسارع ليس لديه اتجاهه الزمني وفضاؤه الخاص ويتقاسم في كل لحظة من زمنه في الاتجاهات الزمنية والأفضية لجسيمات مختلفة تتحرك بانتظام ويكون ساكنًا لحظيًا بالنسبة لها. هذان الإطاران القصوريان للمراقبَين A وB هما الإطاران القصوريان اللحظي أو المتحرك بالتلازم

يفهم أعضاء فريق البحث الجذري جيدًا أنه إذا كان الزمكان واقعيًا، فهو ليس مقسمًا إلى أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد، وبالتالي تكون هذه الأفضية (والأزمنة) هي ببساطة *أوصاف* للزمكان رباعي الأبعاد الغير قابل للانقسام بلُغتنا ثلاثية الأبعاد. يعد هذا مثيرًا للسخرية إلى حد ما، في يوم من الأيام، قد ينظر علماء أكثر اعتدالاً إلى الزمكان على أنه مجرد وصف للكون الواقعي ثلاثي الأبعاد، ولكن ربما يتضح أن الكون ثلاثي الأبعاد هو الذي يكون وصفًا للزمكان الواقعي. لهذا قد يفضل الباحثون الجذريون أن يُعرِّفوا حركة الجسيمات المنتظمة والمتسارعة، ليس بالنسبة إلى فضاء، وإنما بدلالة أنابيبها الكونية التي تَكُون عناصر من الزمكان، والتي تعكس حالات حركتها القابلة للكشف عمليًا. لو كان الجسيم لا يبدي أي مقاومة لحركته، فإنه يكون متحركًا بانتظام من تلقاء نفسه (أيْ بالقصور الذاتي) ويكون خطه الكوني خطًا مستقيمًا في زمكان مينكوفسكي. ولو كان الجسيم يقاوم حركته، فإنه يكون متسارعًا ويكون خطه الكوني منحنيًا. فكرة تعريف الحركة المنتظمة والمتسارعة للجسيمات من حيث شكل خطوطها الكونية يُمليها علينا أيضًا السبب التالي. لو أن فريق البحث الجذري على صواب، وأن مفهوم الزمكان يمثل على نحو كافٍ الكون الخارجي، عندئذ تكون الحركة لجسيمات ثلاثية الأبعاد في الفضاء ليس لها نظير موضوعي، وتكون أيضًا وصفًا للطريقة التي ندرك بها الخطوط الكونية للجسيمات. بما أنه لا توجد حركة في الفضاء، لو أن الزمكان واقعي، فإن ما ندركه من حركة منتظمة ومتسارعة للجسيمات ينبغي أن يُمَثَّل بخطوط كونية مستقيمة ومنحنية، على التوالي.

في الفصل الثالث، رأينا أن فريقي البحث التقليدي والجذري كان لديهما رأيان مختلفان تمامًا حول القصور الذاتي. اقتنع العلماء التقليديون بأن الحركة المنتظمة المطلقة موجودة ولكن لا يمكن اكتشافها بتجارب ميكانيكية بسبب القصور الذاتي للأجسام الفيزيائية التي تشملها تلك التجارب. أما

بالنسبة لأعضاء فريق البحث الجذري، فإن القصور الذاتي يكون نتيجة لعدم وجود الحركة المنتظمة المطلقة. وبما أن عدم وجود الحركة المنتظمة المطلقة يقتضي ضمناً وجود كون رباعي الأبعاد، نستنتج من ذلك أن القصور الذاتي هو مظهر للبعدية الرباعية للكون. مثل هذا الاستنتاج متسق مع الصلة بين شكل الأنبوب الكوني لجسيم ما وبين حالة حركته. الجسيم المتحرك بانتظام يتحرك من تلقاء نفسه ولا يقاوم حركته. على الرغم من ذلك، ليس من الواضح لماذا لا توجد مقاومة لحركة الجسيم وما الذي يجعله يتحرك من تلقاء نفسه. يقدم الزمكان تفسيرًا بسيطًا على غير المتوقع، يكون الأنبوب الكوني لجسيم ما مستقيمًا حتى يقوم أنبوب كوني آخر بجعله منحنيًا، مما يعني أن الجسيم يتحرك بانتظام من تلقاء نفسه حتى يمنعه جسيم آخر من فعل ذلك. ولأن أعضاء فريق البحث الجذري ينظرون إلى الأنبوب الكوني للجسيم على أنه جسم واقعي رباعي الأبعاد، فسوف يصلون بالتأكيد إلى الاستنتاج الذي لا يمكن إغفاله، والذي مفاده أن الأنبوب الكوني المستقيم، مثله مثل قضيب عادي ثلاثي الأبعاد، ليس مشوهًا ولا يقاوم أي تشوه؛ وبالتالي، بلغة البعدية الثلاثية، لا يبدي الجسيم أي مقاومة لحركته المنتظمة. بينما يكون الأنبوب الكوني لجسيم متسارع، على الرغم من ذلك، منحنيًا، وينبغي عليه أن يقاوم التواءه، مما يعني أن الجسيم يجب عليه أن يقاوم حركته المتسارعة. سوف يبتهج فريق البحث الجذري، يبدو القصور الذاتي، كما توقعوا، مظهر تأييد للبعدية الرباعية للكون.

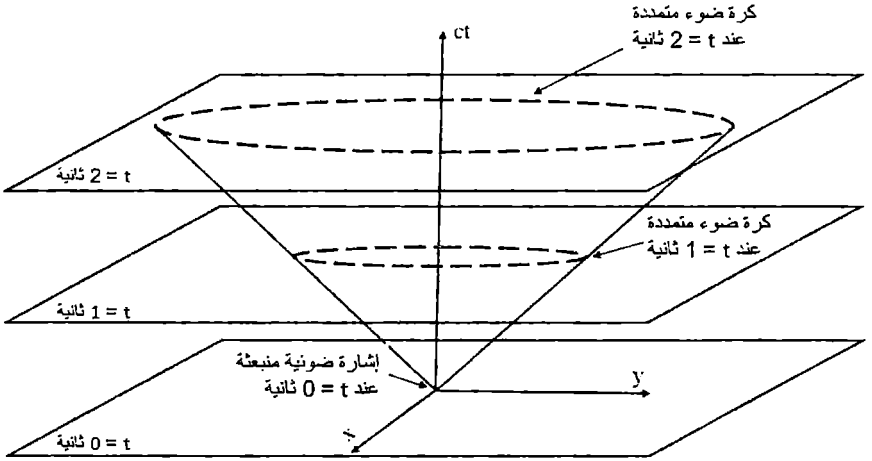
- يمثل أنبوب كوني مستقيم في زمكان مينكوفسكي جسيمًا يتحرك بانتظام من تلقاء نفسه ولا يقاوم حركته المنتظمة.

- يقاوم أنبوب كوني منحنٍ تشوهَه، ويمثل جسيمًا يتسارع ويعارض تسارعه.

الخطوة التالية التي من المحتمل أن يتخذها فريق البحث الجذري في فهم العلاقات بين تجربتنا الإدراكية وبين أجسام الزمكان رباعية الأبعاد أبدية الوجود هي اختبار ما يبدو عليه انتشارُ الضوء الذي ندركه في فضائنا ثلاثي الأبعاد عندما يكون في الزمكان. لكنهم قبل أن يفعلوا ذلك، يحتاجون أن يعيروا انتباهًا أكثر إلى محور الزمن الذي يمثل البعد الزمني. والسبب هو أن عليهم تحديد الطريقة التي يُقام عليها الخط الكوني لشعاع الضوء المنتشر بالنسبة إلى الأبعاد المكانية والزمانية. إذا رُمز لمقدار سرعة الضوء بالرمز c، فإن معادلة انتشار شعاع ضوء على طول المحور x هي x=ct. تبين هذه المعادلة أن هناك احتمالين: يمكننا رسم إما t أو ct على محور الزمن. ومن أجل الحصول على تناسق بين جميع أبعاد الزمكان الأربعة بمعنى أن تكون جميعها مقاسة بنفس الوحدات – وهي الطول – اختار الباحثون رسم ct على محور الزمن. بهذا الاختيار سوف يصنع الخط الكوني لشعاع ضوئي زاوية مقدارها 45° مع محور الزمن، كما تبين المعادلة x=ct.

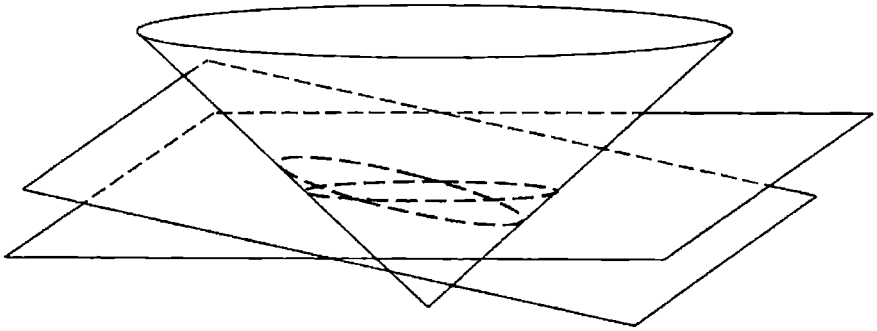
يصور شكل ٤,٤ تمدد كرة ضوء مثل تلك التي استخدمت في التجربة الفكرية المُصَمَّمة من قبل فريق البحث التقليدي للكشف عن الحركة المنتظمة المطلقة، كما ناقشنا في الفصل الثالث. تنبعث عند الحظة t=٠ ثانية إشارة ضوئية وتبدأ موجة ضوء كروية في التمدد. نتصور عند لحظات مختلفة من الزمن كرات ضوء بأنصاف أقطار مختلفة. ومع ذلك، لا يوجد كرات ضوء ثلاثية الأبعاد متمددة في الزمكان. التاريخ الكامل لإشارة الضوء المنبعثة يُدرَك هناك بالكامل على أنه "مخروط" ضوئي رباعي الأبعاد. "تقطع" أفضيتنا اللحظية ثلاثية الأبعاد المناظرة للحظات مختلفة من الزمن مقاطع عرضية مختلفة من المخروط الضوئي، وهي ما نفسرها على أنها كرة الضوء المتمددة عند لحظات مختلفة.

يدرك أعضاء فريق البحث الجذري على الفور أنه، إذا كان المخـــروط الضوئي رباعي الأبعاد ليس مجرد ممارسة في التفكير المجرد، ولكنه جـــزء من الواقع الحقيقي، ومن ثم فإن المفارقة الظاهرة الموضحة بالرسم في شكل ٣,٦ بأن المراقبَين A وB لديهم كرتا ضوء مختلفتان (نشأتا من نفس الإشارة الضوئية) تجد تفسيرا طبيعيًا. كما هو مبين في شكل ٤,٥، "يقطع" فـضاء A وB ثلاثيا الأبعاد الغير متطابقين مقاطع عرضية مختلفة (كرات ضوء مختلفة ثلاثية الأبعاد) من المخروط الضوئي ثلاثي الأبعاد.(*) وبهذا يكون المخـــروط الضوئي هو نفسه الإشارة الضوئية، أما الأفضية ثلاثيـــة الأبعـــاد لمـــراقبين مختلفين في حالة حركة نسبية سوف "تقطعه" بزوايا مختلفة، وبالتالي سيكون لديهم كرات ضوء مختلفة ثلاثية الأبعاد.



شكل ٤,٤ كرة الضوء المتمددة المُتَصوَّرة هي فـــي الحقيقـــة "مخـــروط" ضوئي رباعي الأبعاد في الزمكان

(*) في شكل ٤,٥ ليس للمقطعين نفس الشكل – أحدهما دائرة، بينما الآخر قطع نـــاقص. ولكن في الهندسة الإقليدية الزائفة للزمكان، يقطع فضاءان ثلاثيا الأبعـــاد المخـــروط الكوني في كرتين ضوئيتين.



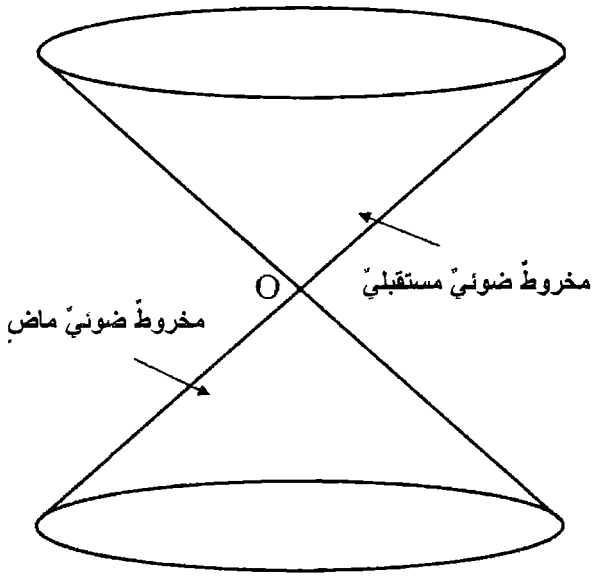
شكل ٤,٥ الفضاءان ثلاثيا الأبعاد اللحظيان لمراقبَين في حالة حركة نسبية يقطعان المخروط الضوئي رباعي الأبعاد لإشارة ضوئية ما عند زوايا مختلفة. يُفسَّر المقطعان العرضيان بواسطة المراقبَين على أنهما كرتان ضوئيتان

الباحثون في الفريق الجذري أنفسهم ليسوا متأكدين مما إذا كان سوف يتضح أن تلك الفكرة المبالغ فيها عن مفهوم الزمكان لها أي علاقة بالكون الخارجي، ولكن هدفهم هو رؤية مدى التنبؤات العملية التي سيقودهم إليها استكشاف المنطق الداخلي لهذه الفكرة. وهنا يكون لديهم مرة آخرى فرصة إضافية لاختبار اتساقها الداخلي، لقد وجدت مفارقة كرتي الضوء في شكل ٣,٦ تفسيرًا أنيقًا. الباحثون من هذا الفريق على دراية أكيدة بأن الاتساق الداخلي لا يثبت فرضية ما، ولكنهم على دراية أيضًا بأن أي فرضية لديها أي فرصة لتأكيدها عمليًا يجب أن تكون متسقة داخليًا.

حتى الآن، مفهوم المخروط الضوئي يعكس فقط التاريخ المستقبلي لإشارة ضوئية منبعثة من نقطة معيَّنة. لكن ماذا عن تواريخ جميع الإشارات الضوئية التي تصل إلى نفس النقطة؟ وذلك سؤال مهم لأن ما نراه عند لحظة معينة هو جميع الإشارات الضوئية التي تصل لأعيننا عند تلك اللحظة. ما نراه في شكل ٤,٦ هو المخروط الضوئي المصاحب لنقطة معينة من

الزمكان، لتكن مثلاً الحدث O. ويتكون من المخروط الضوئي الماضي الذي يحتوي على تواريخ جميع الإشارات الضوئية التي تصل إلى O، والمخروط الضوئي المستقبلي الذي يحتوي على التاريخ الكامل في الوقت الذي انبعثت فيه إشارة ضوئية عند O. إذا اعتبر الحدث O هو اللحظة الحاضرة، عند ذلك يكون المخروط الضوئي الماضي يحتوي على التواريخ الماضية للإشارات الضوئية التي تصل إلى O، بينما يتكون المخروط الضوئي المستقبلي من التاريخ المستقبلي للإشارة الضوئية المنبعثة عند O.

يشرح المخروط الضوئي بوضوح شيئًا كان متوقعًا من قبل فريق البحث الجذري – و هو أن ما "نتصوره" ليس فضاءً واحدًا وإنما يتكون من نقط من أفضية تنتمي للحظات مختلفة من الزمن (كما هو مبين في شكل ٣,٢). كما يبين شكل ٤,٦، سوف يرى مراقب عند حدث O المخروط الضوئي الماضي. إذًا ما يشاهده المراقب عند O هو ما نراه جميعًا في كل لحظة من خبرتنا اليومية – جميع الأجسام من حولنا والفضاء ثلاثي الأبعاد. إلا أن المخروط الضوئي الماضي لا يشكل فضاءً لأن الفضاءُ ثلاثي الأبعاد مُعَرَّف على أنه جميع النقط الموجودة عند لحظة وحيدة من الزمن، بينما الأحداث التي تضم المخروط الضوئي تناظر لحظات مختلفة من الزمن. بصياغة أخرى، سيكون المراقب عند O مقتنعًا بأنه يتصور كونًا ثلاثي الأبعاد، ولكنه ليس كذلك لأن الكون ثلاثي الأبعاد مُعَرَّف عند لحظة وحيدة من الزمن. ومن ثم فإن ما نتصوره ليس فضاءً ثلاثي الأبعاد (أو كونًا ثلاثي الأبعاد)، ولكنه منطقة خاصة من الزمكان – المخروط الضوئي الماضي (شكل ٤,٧). هذه الحقيقة تضعف كثيرًا من مكانة الحجة الحدسية بأن الكون يكون بكل وضوح ثلاثي الأبعاد لأن هذا هو ما نراه.



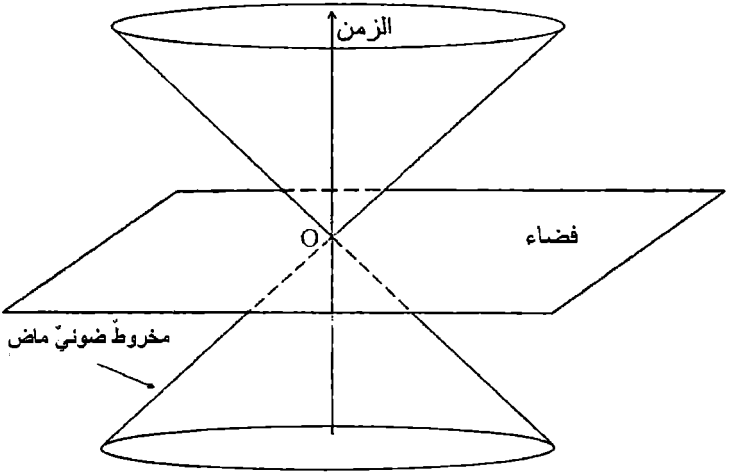
شكل ٤,٦ مخروط ضوئي مصاحب لحدث في الزمكان

المخروط الضوئي هو عنصر من الزمكان ولا يعتمد على إدخال أُطر إسناد تسمح لنا بوصف الزمكان الأبدي الوجود بلغتنا المعتادة ثلاثية الأبعاد. وبهذا يكون أي مخروط ضوئي مصحوبًا بحدث، وليس بخط كوني أو إطار إسناد.

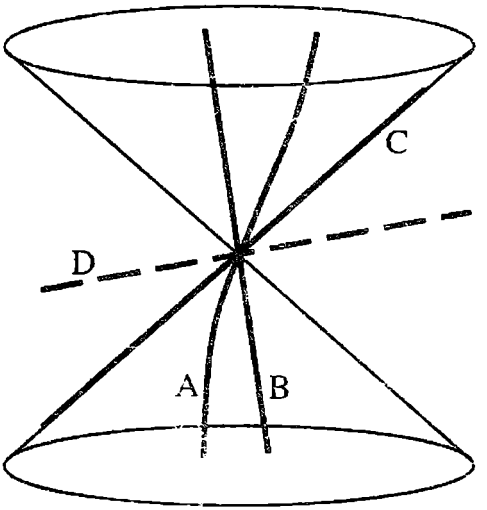
الحقيقة الراسخة التي تقضي بأن يكون مقدار سرعة الضوء متساويًا في جميع أُطر الإسناد القصورية، على عكس مقدار سرعة أي جسيمات أو اضطرابات أخرى، تجعل باحثي الفريق الجذري يظنون أنه ربما يكون هناك مزيد من الفيزياء وراء هذه الحقيقة. لهذا السبب اتجهوا بالنظر إلى كيفية مُقارنة خطوط كونية مختلفة، من المُعتَقَد أنها تحوي تواريخ الزمن الكاملة لجسيمات مختلفة، بالنسبة للخطوط الكونية للأشعة الضوئية. (يمكن تصور أن المخروط الضوئي يتكون من عدد لا نهائي من الخطوط الكونية لأشعة ضوئية.)

بالنظر إلى شكل ٤,٨، من السهل إدراك أنه يمكن تمييز ثلاثة أنواع من الخطوط الكونية، من حيث علاقتها بالخطوط الكونية لشعاع ضوئي. يقع خطا كون A وB في المخروط الضوئي ويمثلان جسيمين لهما سرعة مقدارها أقل من مقدار سرعة الضوء. يقع الخط الكوني C على المخروط الضوئي ويناظر إما الشعاع الضوئي أو الجسيم المتحرك بمقدار سرعة الضوء. الخط الكوني D موضوع خارج المخروط الضوئي ومن الحتمي – بما أن كل خط كوني يمثل جسيمًا – أن يناظر جسيمًا ما وتكون له سرعة مقدارها أكبر من مقدار سرعة الضوء.

يواجه علماء فريق البحث الجذري الآن المهمة التي ربما تكون الأصعب في تحليلهم لسمات الزمكان. ينبغي أن يبدءوا في بناء الشكلية الرياضياتية لفضاء رباعي الأبعاد له ثلاثة أبعاد مكانية وبعد واحد زماني. في كل الأشكال التي استخدموها حتى الآن تبدو الأبعاد الزمانية والمكانية متماثلة تمامًا. من ناحية، يجب أن يكون الحال كذلك، لأن جميع الأبعاد لفضاء ما ينبغي أن تُعطَى دفعة واحدة. في حالة الزمكان يجب أيضًا أن توجد الأبعاد بالتساوي؛ وإلا، إذا لم يكن بعد الزمن مُعطي بالكامل، فقد يكون الزمكان ثلاثي الأبعاد، وليس رباعي الأبعاد. من الناحية الأخرى، رغم ذلك، يُعتَبر البيِّن بذاته أن يكون البعد الزماني مختلفًا عن الأبعاد المكانية. ولكن عندما يصل الأمر إلى شرح المعنى الذي يكون عليه الزمن مختلفًا، يصبح الوضع مُذكِّرًا بالتباس القديس أوجستين Saint Augustine حول الوقت [٩٤]: "إذا لم يسألني أحد، فأنا أعلم؛ وإذا رغبت في أن أفسر لمن سألني، فأنا لا أعلم." معظم الناس مقتنعون بأن هذا الاختلاف مستدل عليه من حقيقة أننا نتصور بُعْد الزمن لحظة بعد لحظة، في حين أننا "نرى" الأبعاد المكانية دفعة واحدة. هذا الاقتناع، على الرغم من ذلك، لا يمكن استخدامه كحجة لأن ما "نراه"، كما يظهر في شكل ٤,٧، ليس فضاءً وإنما هو المخروط الضوئي الماضي.



شكل ٤,٧ يرى مراقب عند حدث O المخروط الضوئي الماضـــي، وليس كونًا ثلاثي الأبعاد (أو فضاء ثلاثي الأبعاد)



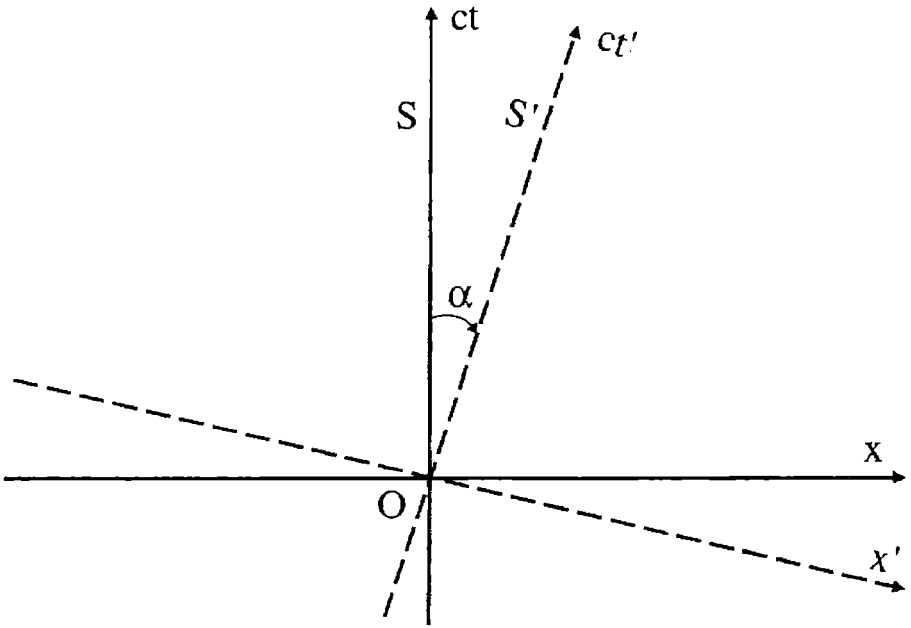
شكل ٤,٨ ثلاثة أنواع مختلفة من الخطوط الكونية

أفضل توضيح للتمييز بين البعد الزماني والأبعاد المكانية هو افتقاد الحرية الكاملة في اختيار اتجاه الزمن. في الفضاء الإقليدي نكون أحرارًا تمامًا في اختيار، اتجاه المحور y، مثلاً. الحال ليس كذلك في الزمكان. افترض أننا نقرر إدخال إطار إسناد قصوري محوره الزمني على طول الخط الكوني D واقعًا خارج المخروط الضوئي (انظر شكل ٤,٨)، مما يعني أن الخط الكوني B سوف يقع بالكامل في فضائنا اللحظي ثلاثي الأبعاد. ولكن بما أن الخط الكوني B يحوي التاريخ الكامل للجسيم المُناظر له، فإن مثل ذلك الاختيار لاتجاه الزمن قد يعني أن هذا الجسيم الموجود في جميع لحظات تاريخه قد يظهر للحظة (وبالتالي بالتزامن) في فضائنا من لا شيء، ثم بعد ذلك قد يختفي مرة أخرى. عدم وجود أي دليل على تلك الوقائع يوحي بأنه لا يمكننا اختيار اتجاه زمن على طول خط كوني يقع *خارج* المخروط الضوئي. ومع ذلك، كان علينا، بنفس الحجة، افتراض أنه من غير المحتمل بدرجة عالية وجود جسيمات تتحرك بسرعات مقدارها أكبر من مقدار سرعة الضوء. إذا اخترنا محور الزمن لإطار الإسناد القصوري الخاص بنا على طول الخط الكوني B، سوف يقع الخط الكوني D، الذي يحوي التاريخ الكامل لجسيمات افتراضية فائقة الضيائية، بالكامل في فضائنا اللحظي ثلاثي الأبعاد. قد يعني هذا أنه عند لحظة معينة من زمننا سوف يظهر الجسيم فائق الضيائية في فضائنا اللحظي موجودًا *بالتزامن* عند كل لحظات تاريخه. مثل هذا الشيء، المشتمل على أجسام ماكروية عادية، لم يلاحَظ أبدًا، لو أننا نستطيع الوصول إلى نفس الاستنتاج في حالة الجسيمات الميكروية، إذاً فسوف يكون لدينا سبب جيد للاقتناع بأن الجسيمات فائقة الضيائية غير موجودة. وسيكون لدينا أيضًا سؤال جيد نطرحه: لماذا يكون الوجود غير ممكن لفئة كاملة من الخطوط الكونية المحتملة في الزمكان؟

السؤال التالي الذي يطرحه فريق البحث الجذري هو عما إذا كان باستطاعتنا اختيار محور زمن على طول خط كوني يقع على المخروط الضوئي. في هذه المرحلة من تحليلهم لا يبدو أن هناك إجابة يمكن استنتاجها بسهولة. ورغم ذلك، هناك مؤشرات واضحة بأن خيارًا كهذا لن يكون ممكنًا أيضًا. إن إطار إسناد قصوري مصاحبًا للخط الكوني لشعاع ضوئي سيكون متحركًا بمقدار السرعة الثابت c بالنسبة إلى جميع أُطر الإسناد القصورية الأخرى، وبالتالي سوف يكون بهذا المعنى إطار إسناد متميزًا. بل إن الأكثر جدية من ذلك هو أن ارتباط إطار إسناد قصوري بشعاع ضوئي يؤدي إلى تناقض مع النتيجة الأولى من تفسير "انعدام وجود الحركة المطلقة" لمبدأ النسبية لجاليليو، وهو أن مقدار سرعة الضوء ثابت في جميع أُطر الإسناد القصورية. ولأن الشعاع الضوئي حسب التعريف قد يكون ساكنًا في إطار إسناد قصوري مصاحب له، ينتج من ذلك أن الضوء لم يكن ليتحرك في إطار إسناد قصوري محوره الزمني على طول الخط الكوني لشعاع ضوئي.

وهكذا يصل فريق البحث الجذري إلى نتيجة مفادها أن جميع الاتجاهات الزمنية الممكنة تقع في المخروط الضوئي. يوحي لنا هذا بأنه ينبغي النظر إلى جميع الخطوط الكونية في المخروط الضوئي على أنها مختلفة موضوعيًا عن نوعي الخطين الكونيين الآخرين. ولذا، يبدو أن مقدار سرعة الضوء الثابت يلعب دورًا ما مهمًا في الطبيعة لأن المخروط الضوئي هو ما يُعَرِّف الأنواع المختلفة من الخط الكوني. دعنا نسمي الخطوط الكونية الواقعة داخل المخروط الضوئي أشباهًا زمنية، والخطوط الكونية على المخروط الضوئي نفسه أشباهًا ضوئية. الخطوط الكونية الافتراضية التي توضع خارج المخروط الضوئي يمكن تسميتها بالخطوط الكونية شبه الفضائية.

بعد تحليل الأجسام الأساسية للزمكان واستنتاج أن أبعاده الزمانية والمكانية تكون متساوية من ناحية (فكلها تُعطى دفعة واحدة)، ولكنها مختلفة من ناحية أخرى (لا يمكن استبدال بُعْد الزمن ببُعْد مكاني)،[*] يستطيع فريق البحث الجذري أن يبدأ في العمل على وصف رياضياتي للزمكان.



شكل ٤,٩ محورا الزمن لمراقبَيْن في حالة حركة نسبية تم اختيارهما على طول خطي كون المراقبين (المتطابقين مع محوري الزمن في الشكل)

(*) ينبغي معاملة الأبعاد الزمانية والمكانية كما وضعها تيلور Taylor وويلر Wheeler [٢٥، ص ١٨]: "على قدم المساواة، نعم؛ نفس الطبيعة، لا."

٤,٢ استنتاج تحويلات لورنتز

إن فكرة الباحثين لوصف رياضياتي للزمكان بسيطة إلى حد كبير. فهم يريدون أن يروا ما إذا كانت الفرضية التي تفيد بأن الكون الخارجي رباعي الأبعاد تؤدي إلى تنبؤات يمكن اختبارها. ولأن مثل ذلك الكون، الذي أسميناه الزمكان، يُعطى دفعة واحدة مثل السطح ثنائي الأبعاد للصفحة التي تقرأها الآن، فأول شيء يمكن فعله هو دراسة هندسته – أي العلاقات بين الخطوط الكونية المُتَضَمَّنة في الزمكان. ونظرًا لوجود تشابه واضح بين خطوط في الفضاء الإقليدي العادي والخطوط الكونية في الزمكان، فسوف يبدأ الباحثون بالعلاقات المعروفة جيدًا بين الخطوط المرسومة على فضاء (سطح) إقليدي ثنائي الأبعاد وفحص العلاقات المناظرة بين الخطوط الكونية في زمكان ثنائي الأبعاد (حيث تم حذف بعدين مكانيين من الزمكان رباعي الأبعاد). ثم سيترجمون العلاقات القائمة بين الخطوط الكونية إلى لغة الأبعاد الثلاثية العادية لكي يروا ما إذا كانت فرضية الزمكان تصنع تنبؤات يمكن ملاحظتها.

اعتبر خطين كونيين متوازيين يناظران مراقبَين في حالة سكون بالنسبة لبعضهما. إذا كان الخطان الكونيان يصنعان زاوية ما، فإن المراقبَين يكونان في حالة حركة نسبية. عندما ندخل إطاري الإسناد القصوريين S و'S بمحوري زمن على طول الخطين الكونيين، يظهر بسهولة أن إطاري الإسناد قد أُديرا بالنسبة لبعضهما كما هو مبين في شكل ٤,٩.

يوحي هذا إلى فريق البحث الجذري بأن يحاولوا إيجاد التحويلات بين إطاري إسناد قصوريين في حالة حركة نسبية باستخدام التحويل المعروف

بين نظامي إحداثيات K و'K بدوران بالنسبة لبعضهما. مثل هذا التحويل يكون حاسمًا لأي نظرية تزعم أنها تصف حقائق موضوعية. الطول بين نقطتين في فضاء إقليدي ثنائي الأبعاد، على سبيل المثال، هو حقيقة موضوعية. وبما أنه باستطاعتنا اختيار أنظمة إحداثيات مختلفة لحساب الطول، فإن من الواضح أن الحسابات لا تعتمد على اختيارنا لنظام إحداثي ما وأنها تعطي نفس الطول. بعبارة أخرى، ينبغي أن يظل الطول لامتغيرًا عندما نختار نظام إحداثيات مختلفاً لحساب نفس الطول.

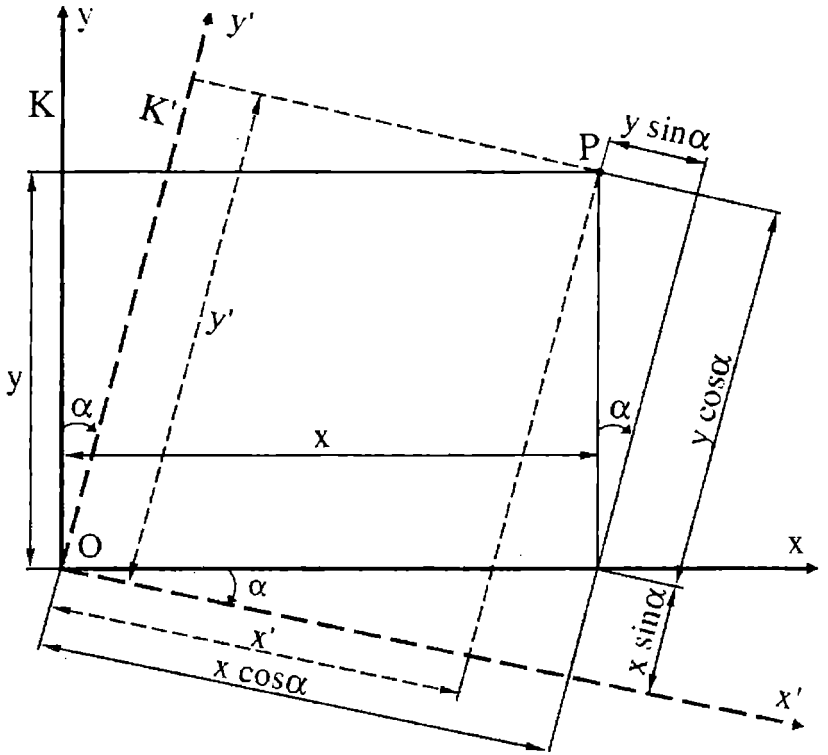
التحويلات الأكثر عمومية بين نظامين للإحداثيات تشمل انتقال النظامين ودورانهما. ومع ذلك، قد يرغب فريق البحث التقليدي أولاً في فحص التحويلات الدورانية، لأن الدوران في الزمكان يكون مناظرًا لحركة نسبية بين إطاري إسناد قصوريين.

لنعتبر نظام إحداثي 'K أُدير خلال زاوية α بالنسبة لنظام إحداثي آخر K (شكل ٤,١٠). الإحداثيات لنقطة ما P هي (x,y) في K و('x,'y) في 'K.

يمكن استنتاج تحويلات الإحداثيات K إلى الإحداثيات 'K، أيْ 'K→K ، مباشرة من شكل ٤,١٠:

$$\begin{cases} x' = x\cos\alpha - y\sin\alpha\,, \\ y' = x\sin\alpha + y\cos\alpha\,. \end{cases} \qquad (4.1)$$

من السهل التأكد أن هذه التحويلات تُبقي على المسافة بين نقطتين في الفضاء الإقليدي ثنائي الأبعاد لامتغيرة. الطول OP في 'K هو $l'^2 = x'^2 + y'^2$. وبالنسبة لطول OP في K، فإن التحويل (٤,١) يعطي $l^2 = x^2 + y^2$



شكل ٤,١٠ نظامان إحداثيان يداران في فضاء إقليدي ثنائي الأبعاد

الآن يريد فريق البحث الجذري أن يروا ما إذا كان يمكن للتحويلات (٤,١) في الفضاء الإقليدي أن تُستَخدم مباشرة في الزمكان لحالة إطاري إسناد قصوريين S و'S أُديرا بالنسبة لبعضهما كما هو مبين في شكل ٤,٩. رغم ذلك، لن ينجح استبدال ct بدلاً من y ببساطة في (٤,١) لأن مثل هذا التعويض لا يزال يحافظ على حريتنا في مُبادلة مكاني المحورين x وct. عندما يُبدّل مكانى x وy (اللذين يمثلان بعدين مكانيين) فلن يتغير شيء ، ولكن هذا نفسه لا يمكن أن يحدث في الزمكان لأن ct وx يمثلان بعدين ذَوَيْ طبيعة مختلفة. عند هذه النقطة يواجه فريق البحث الجذري صعوبة جدّية.

فالمشكلة التي عليهم حلها لم يواجهها أحد قبلهم. وأقرب موقف هو ذلك الذي عنده تم التعامل مع قضية الأعداد الحقيقية والتخيلية. التمثيل الهندسي للأعداد المركبة يشمل محورًا للعدد الحقيقي وآخر للعدد التخيلي؛ ولا يمكن تبديل المحورين. وعلى الرغم من أن الحالتين مختلفتان إلى حد كبير، فإن فريق البحث الجذري يقرر أن يجرب الوحدة التخيلية $i = \sqrt{-1}$ للتمييز بين الأبعاد الزمانية والمكانية في الزمكان.

لا يهم أن نختار المحاور (ict, x, y, z) أو (ct, ix, iy, iz)؛ وإنما المهم هو أنه لا يمكن تبديل الإحداثيات الزمانية والمكانية في الزمكان، مما يعكس الطبيعة المختلفة للأبعاد الزمانية والمكانية في الزمكان. على الرغم من ذلك، فإن ضربًا إحداثيًا في i يجعله تخيليًا، بينما ما نقيسه، بما في ذلك الفترات الزمانية والمكانية، يُمَثَّل فقط بأعداد حقيقية. يعلم فريق البحث الجذري أنهم في حاجة إلى الوحدة التخيلية i فقط كعامل انتقال للتمييز بين الإحداثيات الزمانية والمكانية عندما ينقلون المعادلات من الإقليدية إلى الزمكانية. من أجل هذا يقررون استخدام فقط المعادلة (المحتوية على كميات حقيقية) التي تكون مضروبة في i، بعد أن يتم اكتمال الانتقال.

سوف يكون فريق البحث التقليدي غاضبًا من مثل هذا الاستخدام السيئ للرياضيات، حتى إنهم سوف يوضحون لزملائهم من فريق البحث الجذري أنهم، من أجل رغبتهم المشتركة في فهم المعنى الفيزيائي لمبدأ النسبية لجاليليو، كانوا يتبعون الفرضيات الغريبة لزملائهم الجذريين، ولكن الفريق الجذري ذهبوا بعيدا جدا بنهجهم الفني تجاه الرياضيات. قد يجادل العلماء التقليديون في أن الرياضيات لديها قواعد ثابتة لا يمكن ليُّها لاستيعاب الفرضيات الغريبة التي ليس لها علاقة بالكون الواقعي. ربما يكون رد الفعل الأكثر احتمالاً لفريق البحث الجذري هو أن يفسروا بهدوء أن أهم شيء في الرياضيات هو الاتساق الداخلي؛ لذلك، إذا ما أُدْخِل شيء ما بطريقة

متسقة بذاتها واستُنتِجَت التوقعات، سيكون من الحكمة أن تُترك التجربة لتقول كلمتها عن كل من الفرضية الابتدائية وصياغتها الرياضياتية. قد يشهد كلا الفريقين ذات يوم حالات أدخل فيها العلماء بواعث رياضياتية أحدث، تواجه في البداية اعتراض علماء الرياضيات ولكنها تكون مقبولة في وقت لاحق كأعضاء جديرين بالاحترام في العائلة الرياضياتية المتنامية. ولكن بالنسبة للوقت الحالي سوف يستمر فريق البحث الجذري مع هدفه في الاختبار العملي لفرضية أن الزمكان رباعي الأبعاد يمثل الكون الحقيقي.

إن التحويلات الدورانية النموذجية (٤,١) ليست في أفضل صورة من أجل نقلها إلى تحويلات دورانية زمكانية. السبب هو أنها تحتوي على $\sin\alpha$ و $\cos\alpha$، بينما ينبغي للتحويلات الزمكانية أن تحتوي على $\tan\alpha = \Delta x/\Delta y$، لأن انتقال $\tan\alpha$ سوف يشتمل على السرعة النسبية بين إطاري الإسناد القصوريين S و S' (شكل ٤,٩)؛ وذلك واضح كذلك من حقيقة أن $\tan\alpha$ سوف تحتوي على النسبة $\Delta x/\Delta ct$، وهي v/c، كما يظهر في شكل ٤,٩. ولقد رأينا بالفعل أن الزاوية بين الخطين الكونيين لجسيمين تناظر السرعة النسبية للجسيمين.

أُعيد كتابة التحويلات الدورانية بسهولة بدلالة $\tan\alpha$. باستخدام المُتَطابِقة المثلثية $\sin^2\alpha+\cos^2\alpha=1$، تصبح المعادلة الأولى من (٤,١):

$$x' = x\cos\alpha - y\sin\alpha = \frac{x\cos\alpha - y\sin\alpha}{(1)^{1/2}}$$

$$= \frac{x\cos\alpha - y\sin\alpha}{(\cos^2\alpha+\sin^2\alpha)^{1/2}} = \frac{\cos\alpha(x - y\tan\alpha)}{\cos\alpha(1+\tan^2\alpha)^{1/2}}$$

$$= \frac{x - y\tan\alpha}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}}\,.$$

وبما أن المعادلة الثانية من (٤,١) يمكن إعادة كتابتها بنفس الطريقة، فإننا نحصل على الشكل الجديد للتحويلات الدورانية:

$$x' = \frac{x - y\tan\alpha}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}}\,, \tag{4.2}$$

$$y' = \frac{y + x\tan\alpha}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}}\,. \tag{4.3}$$

والآن يمكن لفريق البحث الجذري نقل التحويلات الدورانية الإقليدية (٤,٢) و(٤,٣) إلى تحويلات دورانية زمكانية بواسطة أحد التعويضين:

$$x \longrightarrow \mathrm{i}x\,, \qquad y \longrightarrow ct\,, \tag{4.4}$$

أو

$$x \longrightarrow x\,, \qquad y \longrightarrow \mathrm{i}ct\,. \tag{4.5}$$

لنستخدم الآن التعويض الأول (٤,٤). كما توقعنا، الزاوية بين الخطين الكونيين، اللذين في اتجاه طولهما تم اختيار محوري الزمن لإطاري الإسناد القصوريين S و'S (شكل ٤,٩)، ترتبط مع السرعة النسبية v للجسيمين المناظرين للخطين الكونيين:

$$\tan\alpha = \frac{\Delta x}{\Delta y} \rightarrow \frac{\mathrm{i}\Delta x}{c\Delta t} = \mathrm{i}\frac{v}{c} = \mathrm{i}\beta\,, \tag{4.6}$$

حيث إننا قد استخدمنا الرمز الشائع الآن $\beta = v/c$. يمكننا الآن نقل المعادلة (٤,٢) لتحويل الإحداثي x:

$$ix' = \frac{ix - ct(i\beta)}{[1+(i\beta)^2]^{1/2}} = \frac{i(x-\beta ct)}{(1-\beta^2)^{1/2}}$$

أو

$$i\left[x' = \frac{x-\beta ct}{(1-\beta^2)^{1/2}}\right] .$$

بالنسبة للمعادلة (٤,٣)، بتحويل الإحداثي الصادي y، نحصل على:

$$ct' = \frac{ct + ix(i\beta)}{[1+(i\beta)^2]^{1/2}} = c\frac{t-\frac{\beta}{c}x}{(1-\beta^2)^{1/2}} .$$

إذًا يؤدي انتقال التحويلات الدورانية $K \to K'$ في الفضاء الإقليدي ثنائي الأبعاد إلى التحويلات الدورانية $S \to S'$ في زمكان ثنائي الأبعاد:

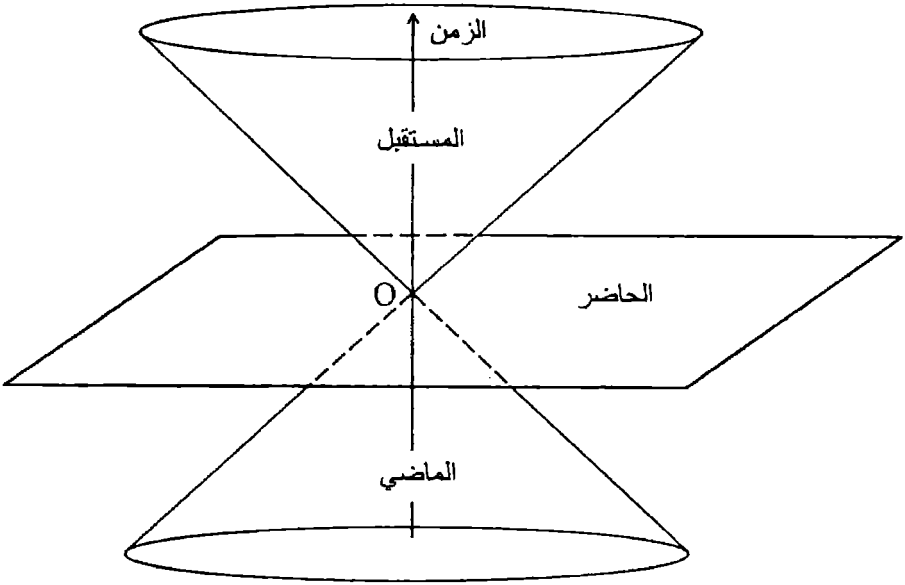
$$x' = \frac{x-\beta ct}{(1-\beta^2)^{1/2}} , \qquad (4.7)$$

$$t' = \frac{t-\frac{\beta}{c}x}{(1-\beta^2)^{1/2}} , \qquad (4.8)$$

حيث إننا طبقنا القاعدة التي بمقتضاها سوف نعتبر فقط المعادلة المضروبة في الوحدة التخيلية i.

نُسلِّم على الفور بأن (٤,٧) و(٤,٨) هما تحويلات لورنتز. حصلنا عليها من خلال التعويض $x \to ix$ و $y \to ct$ (٤,٤)، ولكن من السهل رؤية أن التعويض الآخر (٤,٥) يؤدي أيضًا إلى تحويلات لورنتز (٤,٧) و(٤,٨). كما توقع الباحثون، لا يهم ما إذا كان أي من الزمن أو الإحداثيات المكانية مضروبًا بالوحدة التخيلية i؛ فالهدف هو إيجاد طريقة للتمييز بين الأبعاد الزمانية والمكانية. حتى الآن تم تأكيد اتساق نهجهم.

فحص تحويلات لورنتز يبرهن على أن الثابت c الذي يتطابق مع المقدار الثابت لسرعة الضوء يلعب بالفعل دورا أساسيا في الزمكان، لأنه موجود في التحويلات التي بين إطاري إسناد قصوريين في حالة حركة نسبية. لن يفوت فريق البحث التقليدي الفرصة للفت الانتباه إلى السبب الواضح لمشاركة c في تحويلات لورنتز – كان فريق البحث الجذري هم الذين عرَّفوا محور الزمن بدلالة ct، وأدرجوا c لاحقًا في التعويضين (٤,٤) و(٤,٥). وبالتالي ليس هناك ما يثير الدهشة في وجود c في (٤,٧) و(٤,٨). سوف يفسر فريق البحث الجذري مرة أخرى بهدوء أن ما يجدونه مثيرًا للدهشة هو أن مقدار السرعة c يمثل نوعًا من *مقدار محَدِّد للسرعة* يسري على حركة أي من الأجسام أو العمليات، بالنسبة للسرعات التي مقدارها أكبر من c، تنهار تحويلات لورنتز. صحيح أن c أدخلت من البداية عندما كان محور الزمن مُمَثَّلاً على أنه ct، ولكن دورها كمقدار محَدِّد للسرعة لم يكن متوقَّعًا (ولم يكن مفترضًا سلفًا).



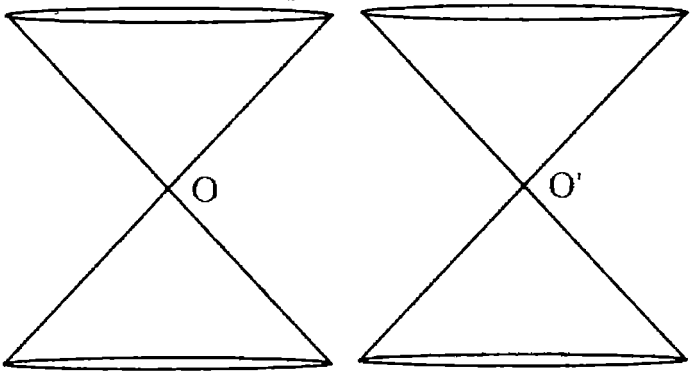
شكل ٤,١١ حقيقة أن c هي السرعة الحدّية تقتضي ضمناً تقسيمًا جديدًا للأحداث – يحتوي المخروط الضوئي الماضي على جميع الأحداث الماضية بالنسبة للحدث O، بينما جميع الأحداث الواقعة على المخروط الضوئي المستقبلي وداخله هي أحداث مستقبلية بالنسبة للحدث O. فقط الحدث O هو ما يُنظَر له على أنه الحاضر. الأحداث خارج المخروط الضوئي ليست ماضيًا ولا حاضرًا. يبين هذا التقسيم الجديد للأحداث أن الرؤية الآنيّة في مأزق لأن الحاضر، أو الكون ثلاثي الأبعاد عند لحظة "الآن"، مُعَرَّف بدلالة التقسيم قبل النسبوي للأحداث إلى ماضي، وحاضر، ومستقبل.

يدرك فريق البحث الجذري أن وجود سرعة محَدِّدة لها تضمينات ليس فقط بالنسبة للفيزياء ذاتها، ولكن أيضًا لنظرتنا الكونية. تؤدي مثل تلك السرعة الحدّية إلى تقسيم (نسبوي) جديد للأحداث ما بين ماضٍ، وحاضر، ومستقبل. يمكن لجميع الأحداث على المخروط الضوئي الماضي وداخله أن

تؤثر على الحدث O، وتكون بالتالي أحداثًا ماضية بالنسبة إلى O، الذي يُعتَبَر حاضرًا. يمكن لحدث O أن يؤثر على جميع الأحداث على المخروط الضوئي المستقبلي وداخله، مما يعني أن الأحداث على المخروط الضوئي المستقبلي وداخله هي أحداث مستقبلية بالنسبة إلى O. الأحداث التي تشغل منطقة خارج المخروط الضوئي ليست ماضيًا ولا حاضرًا. ربما يجادل شخص في أنه يمكن اعتبارها النسخة النسبوية لأحداث الحاضر. على الرغم من ذلك، إذا ما اعتُبِرَت المنطقة خارج المخروط الضوئي أنها الحاضر النسبوي، فإنها لا تكون كونًا ثلاثي الأبعاد، وإنما منطقة رباعية الأبعاد من الزمكان، كما هو مبين في شكل ٤,١١. يبين هذا الموقف أن الرؤية الآنيّة، التي تنص على أن الحاضر – الكون ثلاثي الأبعاد الموجود عند لحظة "الآن" المتغيرة بثبات – هو فقط الموجود، ليست متسقة مع وجود السرعة الحدّية. يجب التأكيد على أن الكون ثلاثي الأبعاد يُعَرَّف فقط بدلالة التقسيم قبل النسبوي للأحداث إلى ماض، وحاضر، ومستقبل، كما هو مبين في شكل ٤,١١.

نقطة أخرى ينبغي التأكيد عليها وهي أنه، على خلاف التقسيم قبل النسبوي للأحداث، لا يؤثر التقسيم النسبوي على وجود الأحداث – الأحداث في المخروط الضوئي الماضي، الحدث O، والأحداث في المخروط الضوئي المستقبلي تكون جميعها موجودة *بالتساوي*. يمكن رؤية هذا في شكل ٤,١٢. اعتبر مخروطين ضوئيين حدثاهما الحاضران هما O و'O، على التوالي. الحال المتساوي لوجود الأحداث الواقعة في مناطق مختلفة من المخروط الضوئي الأيسر يتجلى في حقيقة أن أجزاء من مخروطها الضوئي الماضي

والمستقبل، فضلا عن جزء من منطقتها الخارجية والحدث O، تقع جميعها في المنطقة الواقعة خارج المخروط الضوئي الأيمن.



شكل ٤,١٢ أحداث الزمكان الواقعة في المخروط الضوئي الماضي والمستقبلي ليست منقسمة بموضوعية إلى ماضٍ، وحاضر (حدث O)، ومستقبل. يصبح هذا مؤكدًا إذا نظرنا بعين الاعتبار إلى مخروط ضوئي ثانٍ حدثه الحاضر هو الحدث O'. أجزاء من المخروط الضوئي الماضي والمستقبل، فضلا عن جزء من المنطقة خارج المخروط الضوئي الأول، تقع خارج المخروط الضوئي الثاني

بمجرد حصول فريق البحث التقليدي على تحويلات لورنتز، يمكنهم استنتاج جميع نتائج النسبية الخاصة بالطريقة التي عُمل بها في الكتب النموذجية للنسبية. لكن هذا ليس هدفهم. كما ناقشنا من قبل، يريدون نقل [باستخدام التعويضين (٤,٤) و(٤,٥)] العلاقات بين خطوط في الفضاء الإقليدي العادي إلى علاقات بين خطوط كونية في الزمكان. ثم يُعَبِّرون عن العلاقات بين الخطوط الكونية لأجسام فيزيائية بدلالة لغة الأبعاد الثلاثية العادية التي ستسمح لهم باختبار تلك العلاقات تجريبيًا. بهذه الطريقة سيكون

باستطاعتهم اختبار فرضية أن الخطوط الكونية هي أجسام واقعية رباعية الأبعاد تنتمي إلى كون رباعي الأبعاد.

٤,٣ المسافة الرباعية الأبعاد وثلاثة أنواع من الطول

قبل البدء في فحص العلاقات بين خطوط في الفضاء الإقليدي وترجماتها إلى علاقات بين خطوط كونية في الزمكان، دعنا أولاً نترجم معادلة الطول بين نقطتين (التي تكون لامتغيرة في الفضاء الإقليدي) إلى المعادلة المناظرة للطول رباعي الأبعاد بين حدثين في الزمكان (والتي ينبغي أن تكون لامتغيرة في الزمكان). باستخدام التعويض الأول (٤,٤)، نحصل على

$$l^2 = x^2 + y^2 \longrightarrow (\mathrm{i}x)^2 + (ct)^2 = -x^2 + c^2t^2 \, .$$

إذاً ترجمة مربع المسافة الإقليدية ثنائية الأبعاد l^2 تعطي مربع المسافة s^2 في زمكان ثنائي الأبعاد:

$$s^2 = c^2t^2 - x^2 \, .$$

معادلة المسافة في زمكان رباعي الأبعاد، تسمى أيضًا الفترة، هي

$$s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \, . \qquad (4.9)$$

باستخدام التعويض الثاني (٤,٥)، نحصل على معادلة مختلفة للطول في زمكان ثنائي الأبعاد:

$$s^2 = -c^2t^2 + x^2 \, ,$$

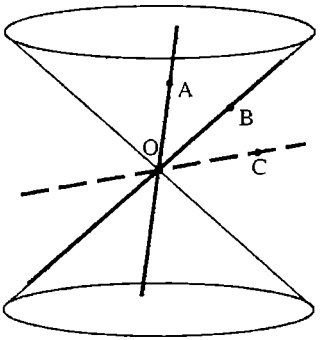
ويكون تعميمها رباعي الأبعاد هو

$$s^2 = -c^2t^2 + x^2 + y^2 + z^2 \, . \qquad (4.10)$$

ربما لم تكن حقيقة أن فريق البحث الجذري حصلوا على معادلتين مختلفتين للمسافة رباعية الأبعاد (٤,٩) و(٤,١٠) مفاجأة لهم. ما أرادوا

تحقيقه كان الحصول على وصف رياضياتي ميَّز بين الأبعاد الزمانية والمكانية. وبالفعل الاختلاف الوحيد بين المعادلتين هو الإشارات المختلفة أمام الإحداثيات الزمانية والمكانية. المعادلتان (٤,٩) و(٤,١٠) متكافئتان، واليوم، تستخدم كتب النسبية إما (٤,٩) أو (٤,١٠). تسمى الإشارات في معادلة الطول ببصمة الفضاء. بصمة الفضاء الإقليدي (للطول) $l^2 = +x^2 + y^2 + z^2$ هي (+++)، بينما بصمة الزمكان هي إما (---+) أو (+++-).

لكي نتأكد من أن الفترة (٤,٩) [أو (٤,١٠)] لامتغيرة تحت تحويلات لورنتز، يمكننا تعميم (٤,٧) و(٤,٨) عن طريق إدراج المحورين y و z. عندما يكون إطارا إسناد قصوريان في حالة حركة نسبية على طول محورهما x، تكون تحويلات لورنتز هي الفترة في 'S هي $s'^2 = c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2$. من السهل التأكد من أن استخدام (٤,١١) لتحويلها إلى الفترة في S يعطي (٤,٩).



شكل ٤,١٣ ثلاثة أنواع من الطول في الزمكان

$$
\begin{aligned}
x' &= \frac{x-\beta ct}{(1-\beta^2)^{1/2}}\,, \\
t' &= \frac{t-\dfrac{\beta}{c}x}{(1-\beta^2)^{1/2}}\,, \\
y' &= y\,, \\
z' &= z\,.
\end{aligned}
\tag{4.11}
$$

لأن معادلة المسافة تحتوي على معلومات مهمة عن هندسة الفضاء،(*) دعنا نفحص عن قرب أكثر الفرق بين الطول

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

في الفضاء الإقليدي وبين

$$s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

في الزمكان. بصمة الفضاءين مختلفة، ولهذا نتائج مهمة. كما يُرى من معادلة l في الفضاء الإقليدي، تكون المسافة l بين نقطتين صفرًا عندما، وفقط عندما، تتطابق النقطتان – ينبغي أن تكون جميع مركبات x، y، وz للطول صفرًا لكي يكون l صفرًا. لكن الحال في الزمكان ليس كذلك. اعتبر خطًا كونيًا افتراضيًا شبه زمني، وشبه ضوئي، وشبه فضائي تمر جميعها خلال رأس المخروط الضوئي المصاحب للحدث O (شكل ٤,١٣).

(*) مثلاً، الطول $l^2 = +x^2 + y^2$ بين نقطتين O وP في شكل ٤,١٠ هو في الواقع نظرية فيثاغورس.

لنحسب الطول في اتجاه كل من الخطوط الكونية. بالنسبة للطول الزمكاني بين الحدثين O و A الواقعين على الخط الكوني شبه الزمني، لدينا

$$\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 > 0 . \qquad (4.12)$$

إن $\Delta s^2 > 0$ تلك يمكن رؤيتها بسهولة أكثر إذا اخترنا إطار إسناد قصوريًا محوره الزمني على طول المسافة شبه الزمنية OA. إذًا $\Delta x = 0$، لأن الحدثين O و A يقعان عند نقطة الأصل لإطار الإسناد $(x_o = x_A = 0)$، ومن الواضح أن $\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 > 0$. في أي إطار إسناد قصوري آخر، سوف يتحرك الجسيم المُمَثّل بالخط الكوني شبه الزمني بسرعة مقدارها $v < c$، مما يعني أن الفترة الزمنية Δt التي يسافر خلالها الجسيم المسافة Δx عندما تضرب في c تعطي طولاً $c\Delta t$ الذي يكون أكبر من Δx. وبذلك، لأي اختيار لإطار الإسناد، تكون الفترة الزمكانية على طول خط كوني شبه زمني هي $\Delta s^2 > 0$.

بالنسبة للطول الزمكاني بين الحدثين O و B الواقعين على الخط الكوني شبه الضوئي. من الواضح أنه سيكون لدينا $\Delta s^2 = 0$. في جميع أُطر الإسناد القصورية يكون مقدار سرعة الضوء ثابت والمسافة Δx التي يقطعها شعاع ضوء، والمُمَثّلة بخط كوني شبه الضوئي، هي $c\Delta t$. الطول الزمكاني بين حدثين O و C، على خط الطول الافتراضي شبه الفضائي، يكون سالبًا $\Delta s^2 < 0$. السبب هو أنه في أي إطار إسناد قصوري سوف يتحرك الجسيم الافتراضي المُمَثّل بخط كوني شبه فضائي أسرع من الضوء وستكون المسافة Δx المقطوعة في زمن Δt دائمًا أكبر من المسافة $c\Delta t$ التي تقطعها الإشارة الضوئية في نفس الزمن Δt. يمكن رؤية هذا بوضوح أكثر في إطار الإسناد القصوري الذي يحتوي فضاؤه ثلاثي الأبعاد لحظيًا على خط كوني افتراضي شبه فضائي. في تلك الحالة $\Delta t = 0$ لأن $t_O = t_C$ و $\Delta s^2 = -\Delta x^2 < 0$.

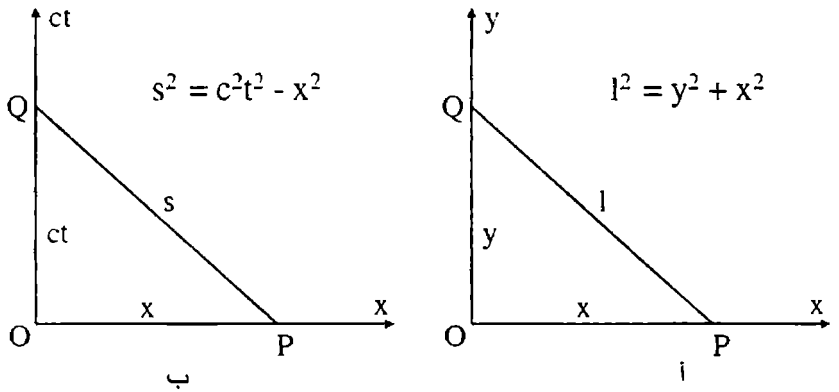
حقيقة أن الطول في اتجاه الأنواع الثلاثة للخط الكوني مختلف تؤكد الاستنتاج الذي يقضي بوجود اختلاف موضوعي بين الخطوط الكونية هذه. لم نحصل على أي تبصر فيما إذا كانت الخطوط الكونية شبه الفضائية (و الجسيمات المصاحبة فائقة الضيائية) موجودة أم لا. ونظرًا لأن مفهوم الزمكان نفسه لا يمنع وجودها فستكون التجربة مرة أخرى هي التي تقرر. هناك حجة متكررة ضد الجسيمات فائقة الضيائية، وبالتالي ضد وجود الخطوط الكونية شبه الفضائية، وهي ما تسمى السببية النسبوية. كما هو مبين في شكل ٤,١٣، في جميع أُطر الإسناد يقع الحدث O *قبل* الحدثين A وB. ويُفسّر هذا على أنه يعني أن O تتسبب في A وB. وعندما يقع حدثان على خط كوني افتراضي شبه فضائي (أو يكونان شبيهي فضاء منفصلين)، فإن ما يقع منهما أولاً يصبح غير معتمد على الإطار، في بعض أُطر الإسناد سوف يقع O قبل C، بينما في أُطر أخرى سيكون C هو ما يقع قبل O. يعارض هذا بوضوح الاعتقاد المقبول بأن السبب يجب أن يسبق تأثيراته (نتائجه). هذا التعارض لفرضية السبب والتأثير (النتيجة)، بالإضافة إلى حقيقة أن c هي مقدار محدّد للسرعة في تحويلات لورنتز (٤,١١) هما السببان في رفض حركات أسرع من حركة الضوء (مما يعني رفض الخطوط الكونية شبه الفضائية أيضًا).

بالنسبة لباحثي الفريق الجذري تبدو قضية السبب والتأثير (النتيجة) مختلفة. بدلالة الزمكان تُعطى جميع أحداث خط كوني ما (ليس فقط شبه الفضائي) دفعة واحدة ولا يحدث موضوعيًا أحدها تلو الآخر. بهذا المعنى لا يحدث حدث خط كوني ما بسبب حدث آخر لنفس الخط الكوني (مثلما لا تقع نقطة على خط بسبب نقطة أخرى على نفس الخط). لو أن الزمكان واقعي، فإن الأحداث لا تحدث، فهي جميعها هناك في الزمكان؛ إنها "تحدث" فقط عندما يُدخَل إطار إسناد لكي يصف الوجود الأبدي لكل الأحداث باستخدام لغة الأبعاد الثلاثية لمفاهيمنا. على الرغم من ذلك، كما ناقشنا من قبل، يعتقد

فريق البحث الجذري أنه من غير المحتمل أن تكون أنابيب الكون شبه الفضائية للأجسام الماكروية موجودة، الأدلة التجريبية الماكروية الموجودة تؤيد بقوة فرضية السبب والنتيجة وترفض وجود أنابيب الكون شبه الفضائية. وبما أن الباحثين من هذا الفريق مهتمون برؤية كيف أن البنية الهندسية للزمكان نفسه تستبعد فئة أنابيب الكون شبه الفضائية، فإنهم يرغبون في معرفة ما تخبرنا به التجربة عن الحركات فائقة الضيائية للجسيمات الميكروية. ومهما يكون الحكم، ستظل هناك أسئلة صعبة مطلوب الإجابة عليها. لو أن الخطوط الكونية شبه الفضائية ليس لها وجود، هل يوجد في البنية الهندسية للزمكان ما يمنع الخطوط الكونية تلك؟ إذا اتضح أن الخطوط الكونية شبه الفضائية للجسيمات الميكروية موجودة، فينبغي استنتاج صيغة فائقة الضيائية من تحويلات لورنتز. في هذه الحالة سيكون السؤال: ما الذي يمنع وجود الخطوط الكونية شبه الفضائية على المستوى الماكروي؟

حقيقة أن هناك ثلاثة أنواع من الطول في الزمكان تكشف عن الاختلاف بين الهندسة الزمكانية والهندسة الإقليدية. ومع أن فريق البحث الجذري توقع ذلك الاختلاف بسبب الطبيعة المختلفة للأبعاد الزمانية والمكانية، فإنهم وجدوا الهندسة الزمكانية غير حدسية إلى حد بعيد. الاختلاف بين أطوال الأشباه الزمنية والأشباه الفضائية كان متوقعًا، ولكن طول الأشباه الضوئية كان مفاجأة تمامًا. من المستحيل ببساطة تصور كيف يمكن للمسافة بين نقطتين غير *متطابقتين* على الخط الكوني شبه الضوئي (لنقل مثلاً O وB في شكل ٤,١٣) أن تكون صفرًا مهما بدا لنا البعد بين النقطتين. بيَّنت هذه الحقيقة لفريق البحث الجذري أنه يجب عليهم الحذر جيدًا في رسوماتهم التوضيحية للزمكان. أي نتائج استنتجت من ذلك الرسم التوضيحي يجب الحصول عليها مستقلة باستخدام تحويلات لورنتز. المخروط الضوئي المرسوم على السطح الإقليدي لقطعة من الورق يعطي

فقط فكرة عما قد يبدو عليه المخروط الضوئي في هندسة الزمكان المختلفة (دعنا نسميها الإقليدية الزائفة). نفس الشيء صحيح لجميع رسومات الزمكان التوضيحية الأخرى التي سنناقشها في هذا الكتاب.



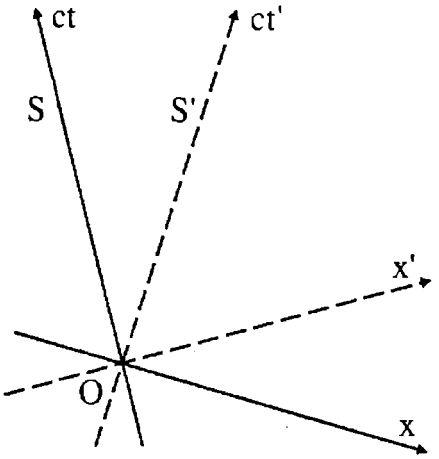
شكل ٤,١٤ نظرية فيثاغورس في الفضاء الإقليدي (أ) وفي الزمكان (ب)

إدراك أن الطول بين حدثين على الخط الكوني شبه الضوئي يكون دائمًا صفرًا يعطي مُبَرِّرًا إضافيًا لنتيجة مفادها أنه لا يمكن ربط إطار إسناد بإشارة ضوئية. إذا كان لنا أن نرفق إطار إسناد قصوريًا بشعاع ضوئي متحرك، فينبغي أن نختار محور الزمن لإطار الإسناد على طول الخط الكوني شبه الضوئي للشعاع الضوئي. قد يعني هذا أن الفترة الزمكانية بين الحدثين O وB (شكل ٤,١٣)، كما حُددت في ذلك الإطار الإسنادي، تكون $\Delta s^2 = c^2\Delta t^2$، حيث إن $\Delta x = 0$ هناك. ولكن في هذه الحالة تكون الفترة الزمكانية صفرًا في أي إطار إسناد آخر، وبسبب لاتغيُّره يجب أن يكون صفرًا في إطار الإسناد المصاحب لشعاع ضوئي أيضًا. وبالتالي، في إطار الإسناد هذا يكون $\Delta t^2 = 0$، مما يعني أنه لا يمكن تعريف زمن هناك. ولهذا لا يمكن ربط إطار إسناد بالخط الكوني شبه الضوئي.

في الهندسة الإقليدية الزائفة للزمكان، تبدو نظرية فيثاغورس مختلفة أيضًا. في الهندسة الإقليدية العادية، مربع الوتر لمثلث (الطول بين النقطتين P وQ في شكل ٤,١٤ أ) يساوي مجموع مربعي الضلعين الآخرين للمثلث: $l^2 = x^2 + y^2$. عندما نترجم هذه المعادلة من خلال التعويض (٤,٤)، نحصل على معادلة نظرية فيثاغورس في الهندسة الإقليدية الزائفة للزمكان: $s^2 = c^2t^2 - x^2$ (شكل ٤,١٤ ب).

الطبيعة الإقليدية الزائفة لهندسة الزمكان والصعوبة في تمثيل العلاقات بين الخطوط الكونية في الزمكان على سطح إقليدي أمران واضحان من فحص تحويلات لورنتز (٤,٧) و(٤,٨) [٢٦، ص ٥٠]. عندما يُدار محور الزمن للإطار 'S بالنسبة لمحور الزمن للإطار S، يدور المحور 'x في الاتجاه المقابل. المهم، على الرغم من ذلك، هو أن الحركة النسبية لجسيمين في الفضاء العادي تُمَثَّل بخطي الجسيمين الكونيين، اللذين *يُداران* بالنسبة لبعضهما في الزمكان.

ولما كان من المفيد تصور العلاقات الإقليدية الزائفة بين الخطوط الكونية في الزمكان، فسوف نحاول وصفها على السطح الإقليدي للصفحة بحيث تكون نتائجها الرئيسية محفوظة. سوف نستخدم القاعدة التالية التي تُطَبَّق فقط على إطاري إسناد قصوريين، والتي يمكن أن يُنظَر إليها على أنها معينة للذاكرة. في شكل ٤,١٤ أ، الضلعان الأصغران للمثلث OPQ يكونان على طول المحورين x وy. ولأن x وy متعامدان، فإن حساب الطول $l^2 = x^2 + y^2$ يتم الحصول عليه من خلال نظرية فيثاغورس.



شكل ٤,١٥ المحور x للإطار S عمودي على 'ct، بينما المحور 'x للإطار 'S عمودي على 'ct

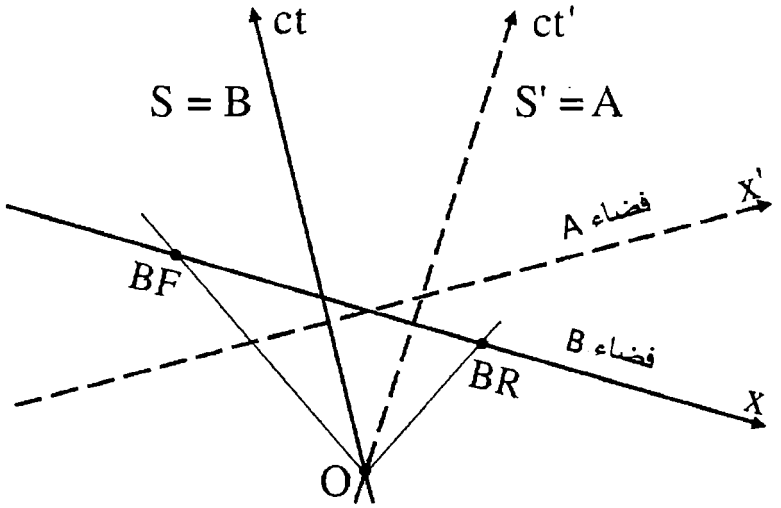
تُستَخدَم الصورة الإقليدية الزائفة لنظرية فيثاغورس أيضًا في حساب الفترة الزمكانية s، وهي المسافة بين الحدثين P وQ. فلتكن المسافة المكانية $s = PQ$ محسوبة في إطاري إسناد قصوريين S و'S في حالة حركة نسبية. بسبب اللاتغير في الفترة الزمكانية $s^2 = s'^2$، يمكننا كتابة المعادلة

$$c^2t^2 - x^2 = c^2t'^2 - x'^2 ,$$

التي يمكن إعادة كتابتها كما يلي

$$c^2t^2 + x'^2 = c^2t'^2 + x^2 . \qquad (4.13)$$

كلٌ من الطرف الأيسر والأيمن من المعادلة (٤,١٣) يبدو مثل الطرف الأيمن لنظرية فيثاغورس $l^2 = x^2 + y^2$. وبما أن x وy متعامدان، يمكننا رسم المحور 'x عموديًا على ct وx عموديًا على 'ct (شكل ٤,١٥).



شكل ٤,١٦ عند الحدث O، عندما تتطابق نقطتا المنتصف لسفينتي الفضاء A وB، تنبعث إشارة ضوئية. بالنسبة لمراقب B، تصل كرة الضوء المتمددة بالتزامن إلى نقطة نهاية B الخلفية (الحدث RB) ونقطة نهاية B الأمامية (الحدث FB). مراقب A، على الرغم من ذلك، يقرر أن الحدث BR يقع قبل الحدث BF.

هذه الطريقة لرسم محاور إطاري إسناد قصوريين في حالة حركة نسبية على السطح الإقليدي للصفحة تُمَثَّل بشكل صحيح نسبية التزامن بالإضافة إلى، كما سنرى في الأقسام التالية، تأثيرات تمدد الزمن وتقلّص الطول. إن شكل ٤,١٥ ذلك الذي يصف على نحو كاف نسبية التزامن، يمكن برهنته في حالة التجربة الفكرية المشتملة على سفينتي فضاء A وB، والتي نوقشت في الفصل الثالث. بالنسبة لمراقبي B، كرة الضوء المنتشرة، المنبعثة عندما كانت نقطتا منتصف A وB متطابقتين لحظيًا، تصل بالتزامن إلى نقطتي نهاية B الخلفية والأمامية. بمعنى آخر، الحدثان BR (يرتطم الضوء بنقطة نهاية B الخلفية) وBF (يصل الضوء عند نقطة النهاية الأمامية) يكونان متزامنين في سفينة الفضاء B، كما هو مبين في شكل ٣,٧. بالنسبة لمراقبي

A، على الرغم من ذلك، وصلت كرة الضوء المتمددة إلى نقطة نهاية B الخلفية أولاً، وبالتالي فإن الحدث BR وقع *قبل* الحدث BF.

كما هو مبين في شكل ٤,١٦، الطريقة التي قررناها لرسم الإحداثيات الزمانية والمكانية لإطاري إسناد قصوريين في حالة حركة نسبية تعكس على نحو كاف الطريقة التي يحدد بها المراقبان في كلا الإطارين الترتيب الذي وقعت به أحداث في أفضيتهما اللحظية. إذا رسمنا المحورين x و'x متعامدين مع t و't، على التوالي، فإن ترتيب الأحداث بالنسبة لمراقبي A يكون خاطئًا.

٤,٤ "التمدد" الصادي في الفضاء الإقليدي وتمدد الزمن في الزمكان

فكرة فريق البحث الجذري هي تحويل علاقات بين خطوط في فضاء إقليدي ثنائي الأبعاد إلى العلاقات المناظرة بين خطوط كونية في الزمكان. يأملون بفعلهم ذلك أن يحصلوا على تنبؤات تجريبية يمكن استخدامها لاختبار واقع الخطوط الكونية، وبالتالي واقع الزمكان. لهذا الغرض سوف نستنتج أولاً العلاقات بين خطوط في فضاء إقليدي ثنائي الأبعاد ثم نترجمها بعد ذلك لكي نجد العلاقة المناظرة بين خطوط كونية في الزمكان. سوف نستخدم التعويض (٤,٤) لكل التحويلات.

لنعتبر نظامي إحداثيات K و'K أديرا بالنسبة إلى بعضهما بزاوية α، كما هو مبين في شكل ٤,١٧. يقيس مراقب في K الطول OA للقضيب الواقع على طول المحور y لنظام إحداثياته فيجده y. في هذه الحالة يتطابق طول القضيب مع مركبته y لأن طول القضيب ليس له مركبة x في K. يجد مراقب في نظام الإحداثيات 'K أن طول القضيب له مركبتان x و y في 'K. يريد ملاحظ 'K أن يقارن مركبات القضيب الصادية في K و'K . لكي يفعل ذلك يمكنه استخدام التحويل الدوراني $K \to K'$ (٤,٣) الذي *يُسقط* نقطة A

فوق 'A على المحور 'y. بملاحظة أن القضيب ليس لديه مركبة x، يحصل مراقب 'K على

$$y' = \frac{y}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}} . \qquad (4.14)$$

يمكن الحصول أيضًا على العلاقة (٤,١٤) بملاحظة الطريقة التي سوف يعين بها مراقب 'K تلك العلاقة. يمكنه تحريك خط موازٍ لمحوره 'x لأعلى حتى يصل إلى نقطة A. ثم يحدد مراقب 'K أين يقطع الخط المتوازي مع 'x المحور 'y ويجد أن المركبة y لطول القضيب في 'K هي $O4' = y'$. كما هو مبين في شكل ٤,١٧، $y' = y\cos\alpha$. باستخدام المتساوية المثلثية $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$ مرة أخرى، يمكننا كتابة $\cos\alpha$ بالطريقة التالية:

$$\cos\alpha = \frac{\cos\alpha}{(1)^{1/2}} = \frac{\cos\alpha}{(\cos^2\alpha+\sin^2\alpha)^{1/2}} = \frac{1}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}} .$$

عندئذ نحصل على

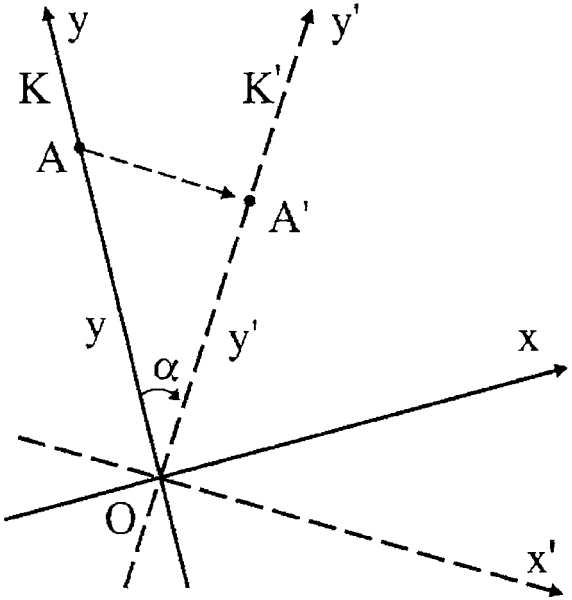
$$y' = \frac{y}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}} .$$

التي تتطابق، كما هو متوقع، مع (٤,١٤). يمكن حساب العلاقة (٤,١٤) بين مركبات القضيب الصادية في K و'K باستخدام لاتغيُّر المسافة في الفضاء الإقليدي. ولأن القضيب لديه فقط مركبة y في K، يكون طوله هناك $l'^2 = x'^2 + y'^2$. وبسبب لاتغيُّر الطول $l^2 = l'^2$، يكون لدينا

$$y^2 = x'^2 + y'^2 = y'^2(1+\tan^2\alpha) .$$

حيث إن $\tan\alpha = x/y$. من هنا نعيِّن 'y:

$$y' = \frac{y}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}} .$$



شكل ٤,١٧ "التمدد" الصادي

تبين هذه العلاقة أن ارتفاع القضيب 'y في 'K أصغر من ارتفاعه y في K. السبب واضح – يقيس مراقب K الارتفاع الواقعي، دعنا نسميه الحقيقي، للقضيب، بينما يحدد مراقب 'K طوله الظاهري لأن القضيب يكون مائلاً في 'K ولديه ليس فقط مركبة رأسية ('y)، ولكن أيضًا مركبة أفقية ('x). هذه حقيقة واضحة في الفضاء الإقليدي، ولكن في الزمكان، تكون نفس هذه العلاقة محيِّرة.

لقد استنتجنا العلاقة (٤,١٤) بين مركبتي y لطول القضيب في K و 'K. الآن يمكننا تحويلها إلى العلاقة بين مركبتي الزمن لقضيب رباعي الأبعاد (ليكن مثلاً، الأنبوب الكوني لساعة) في إطاري إسناد قصوريين S و'S في حالة حركة نسبية باستخدام التعويض (٤,٤) وبتحديد أكثر $y = ct$ و $\tan\alpha = i\beta$:

$$ct' = \frac{ct}{(1-\beta^2)^{1/2}} ,$$

أو بدلالة الزمن وحده:

$$t' = \frac{t}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.15)$$

لكي نفهم معني (٤,١٥)، نفترض أن إطاري الإسناد القصوريين S و'S بهما ساعتان رقميتان متماثلتان عند نقطتي أصلهما. أختير محورا الزمن في S و'S على طول الخطين الكونيين للساعتين كما هو موضح في شكل ٤,١٨. تُضبط الساعتان على الصفر عندما تلتقيان عند الحدث O.

يجري مراقب في S قياسًا بسيطًا – يعين فترة قصيرة من الزمن تبدأ عند الحدث O عندما تُظهر الساعة صفر ثانية على شاشتها وتنتهي عند الحدث A عندما تعرض شاشة الساعة الثانية الخامسة. بعبارة أخرى، يقيس مراقب S جزءًا من الطول الزمكاني لقضيب رباعي الأبعاد – خط الساعة الكوني– وهو الطول OA. كما في شكل ٤,١٧، يكون للقضيب هنا أيضًا "ارتفاع" فقط في S، أيْ مركبة زمن فقط. دعنا نسميها الزمن *الحقيقي*؛ وبالتالي يكون الزمن الحقيقي المُقاس بواسطة مراقب S هو ٥ ثوانٍ.

يقرر مراقب في 'S أن يعين مركبة الزمن (وهو "الارتفاع") لهذا الجزء من القضيب رباعي الأبعاد الذي يكون طوله PA في 'S بهدف مقارنة مركبتي الزمن في S و'S . فيقوم بإسقاط الحدث A فوق الحدث 'A ويجد أن مركبة الزمن (وهو "الارتفاع") للقضيب رباعي الأبعاد أكبر من t ويكون، مثلاً، $t' = 6\ s$ في 'S. بخلاف الحالة الإقليدية حيث يكون $y' < y$، يكون في الزمكان $t' > t$، كما يتضح من (٤,١٥) وشكل ٤,١٨. لهذا يُسَمَّى هذا التأثير الزمني الموصوف بتمدد الزمن. مرة أخرى، يتضح هنا سبب اختلاف

مراقبي S و'S بشأن مركبة الزمن للخط الكوني OA للساعة في S. يقع خط الساعة الكوني في S على طول محور الزمن وتكون له مركبة زمن ("ارتفاع") فقط؛ ذلك هو السبب في أن مراقب S يقيس الطول الحقيقي لخط الساعة الكوني الذي أسميناه الزمن الحقيقي. خط الساعة الكوني الثابتة في S يكون مائلاً في 'S وبالتالي يكون له كلتا المركبتين الزمانية والمكانية. لهذا فإن ما يقيسه مراقب 'S هو زمن ظاهري أو متمدد.

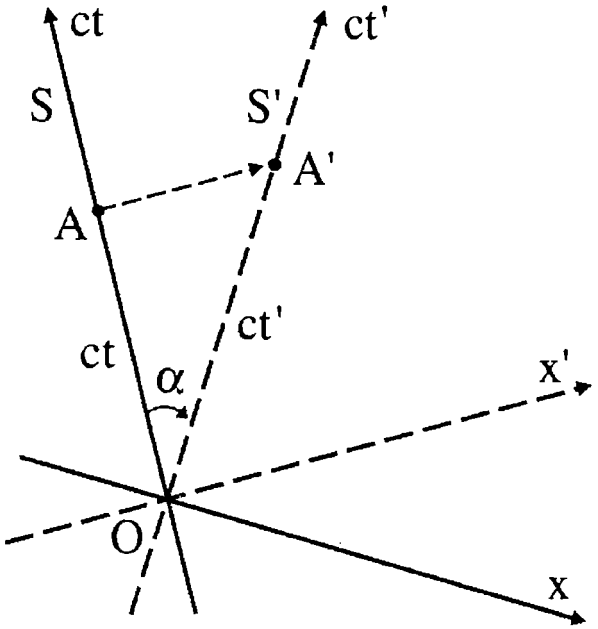
إذا قارنَّا شكلي ٤,١٧ و٤,١٨ سوف نرى أنهما يصوران *نفس* العلاقة بين الخطين الرأسيين في الشكلين. لذلك يتضح أن تأثير تمدد الزمن هو مجرد مظهر لحقيقة أن خط الساعة الكوني له فقط مركبة زمن ("ارتفاع") في إطاره الثابت، بينما في إطار إسناد قصوري آخر، في حالة حركة نسبية بالنسبة إلى إطار ثبات الساعة، يكون خط الساعة الكوني مائلاً، وبالتالي يكون له هناك كلتا المركبتين الزمانية والمكانية. بهذه الطريقة يحصل فريق البحث الجذري على ما كانوا يسعون إليه – تنبؤ يمكن اختباره عمليًا. لقد أكدت التجربة، كما نعلم، تأثير تمدد الزمن الذي يكون، طبقًا لفريق البحث الجذري، دليلاً تجريبيًا لدعم رؤية أن الزمكان يمثل كونًا واقعيًا رباعي الأبعاد. إن فريق البحث الجذري على دراية تامة، احتكامًا لخبرتهم بفريق البحث التقليدي، بأنه ستكون هناك محاولات لتفسير التأثير الذي يتنبأون به بدلالة الكون العادي ثلاثي الأبعاد. لهذا فإنهم يستخدمون طريقة فعالة لاجتياح معارضيهم. ويرغبون في أن يقولوا لهم: "حسنًا. دعونا نفترض أنكم على صواب في أن الكون ثلاثي الأبعاد،" ثم يبينون أن أيًا من تأثيرات الزمكان التي تنبأوا بها لن تصبح ممكنة لو أن الكون كان بالفعل ثلاثي الأبعاد. الفصل الخامس يشرح كيف نجحت هذه الطريقة.

دعنا نعود الآن إلى تأثير تمدد الزمن. بسبب أن تحويلات لورنتز (٤,٧) و(٤,٨) هي تحويلات العلاقة الإقليدية (٤,٢) و(٤,٣) بعد ترجمتها، ينتج من ذلك أن تأثير تمدد الزمن يمكن الحصول عليه أيضًا من تحويل لورنتز (٤,٨). وبما أن الساعة محل السؤال تكون ساكنة عند نقطة أصل S، يكون للحدثين O وA نفس مركبة x $x = 0$ وتؤدي (٤,٨) بالفعل إلى (٤,١٥):

$$t' = \frac{t}{(1-\beta^2)^{1/2}} .$$

لتعيين مركبة الزمن للخط الكوني OA في 'S ينتظر المراقب هناك حتى وقوع الحدث A في فضاء لحظي يناظر لحظة معينة في 'S، ثم يلاحظ تلك اللحظة على شاشة عرض الساعة الثابتة عند نقطة أصل 'S. يمكن تصور هذا عن طريق تتبع نفس الإجراء الذي اتخذه مراقب 'K في الحالة الإقليدية. تخيل خطًا متوازيًا مع 'x وابدأ في تحريكه لأعلى في 'S حتى يصل إلى الحدث A، ثم انظر إلى الحدث عند مكان تقاطع الخط مع محور زمن 'S، أي عند مكان تقاطع الخط مع خط الساعة الكوني الثابتة في 'S. بطريقة أخرى، *يُسقط*(*) مراقب 'S الحدث A فوق الحدث 'A الواقع على محور زمن 'S. فيجد أن الحدث 'A يناظر الثانية السادسة للزمن في 'S ويستنتج أنه، في الوقت الذي تمر فيه خمس ثوانٍ بين الحدثين O وA، وذلك طبقًا لمراقب S، تكون الفترة الزمنية الظاهرية (المتمددة) بين نفس الحدثين كما عُيِّنت في 'S هي ٦ ثوانٍ.

(*) اثنان من تحويلات لورنتز – الفعَّال والسلبي – يُميَّز بينهما في كتب النسبية (انظر على سبيل المثال [٢٦، ص ٤٩] و [٥٦، ص ١١٤٠]). خلال هذا الكتاب، سوف تُستخدَم فقط تحويلات لورنتز السلبية. في الرؤية السلبية يكون لنفس حدث الزمكان محاور مختلفة في أُطر إسناد مختلفة.



شكل ٤,١٨ تمدد الزمن

لا يوجد شيء غامض في هذه النتيجة، ببساطة تكون مركبة الزمن للقضيب رباعي الأبعاد (خط الساعة الكوني) OA المُعَيِّنة في 'S أكبر من مركبة الزمن المُقاسة في S (تمامًا مثلما تكون مركبة y الرأسية للقضيب ثلاثي الأبعاد في الحالة الإقليدية هي الأصغر في 'K). في الزمكان يكون التأثير معكوسًا نتيجة الطبيعة الإقليدية الزائفة للزمكان. لو أن الزمكان واقعي، يكون لتأثير تمدد الزمن تفسير طبيعي، مما يعني أن الخطين الكونيين للساعتين الثابتتين عند نقطتي أصل S و'S هما جسمان واقعيان رباعيًّا الأبعاد. أما إذا لم يكن الزمكان واقعيًا، فإن تأثير تمدد الزمن لن يكون مجرد لغز، بل سيكون مستحيلاً، وذلك إذا ما نُظر إلى وجود الأجسام التي يشملها هذا التأثير على أنه مطلق، كما سوف نرى في الفصل الخامس.

قبل البدء في مناقشة مظهر آخر مؤيد لواقعية الزمكان، دعنا نلاحظ أن تأثير تمدد الزمن يمكن الحصول عليه أيضًا من خلال لاتغيُّر الفترة الزمكانية. الفترة الزمكانية بين الحدثين O و A المُعَيَّنة في S' هي

$$s^2 = c^2t^2 ,$$

حيث O و A لهما نفس المحور المكاني $x = 0$. t هنا هو الزمن الحقيقي بين O و A. في S'، تكون الفترة الزمكانية بين نفس الحدثين هي

$$s'^2 = c^2t'^2 - x'^2 .$$

نتيجة اللاتغيُّر للفترة الزمكانية يكون $s^2 = s'^2$، فيكون لدينا

$$c^2t^2 = c^2t'^2 - x'^2 = c^2t'^2(1 - \beta^2) ,$$

حيث أخذنا في الاعتبار حقيقة أن $x'/t' = v$، ويكون v هو مقدار السرعة النسبي بين S و S' . وأخيرًا،

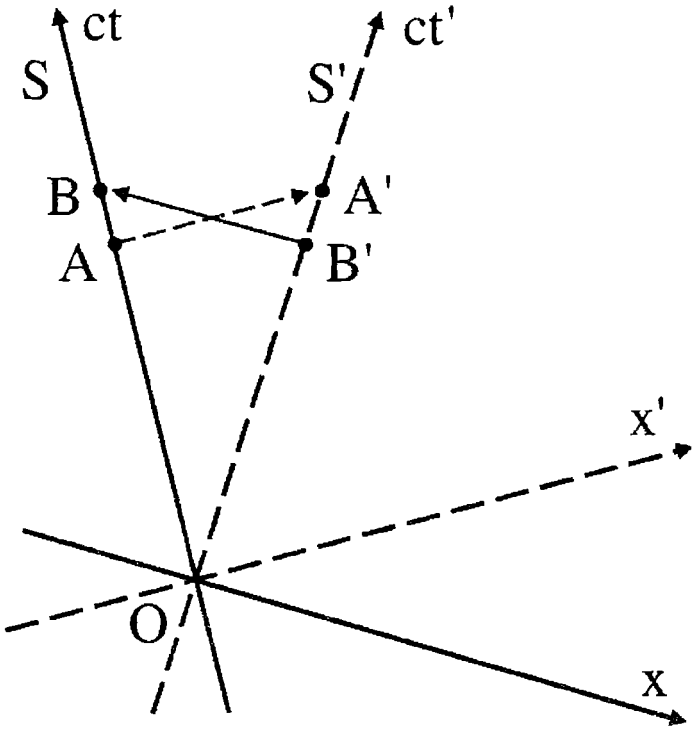
$$t' = \frac{t}{(1 - \beta^2)^{1/2}} .$$

من السمات المهمة لتأثير تمدد الزمن أنه تبادلي. كما هو مبين في شكل ٤,١٩، يقر مراقب S بأن الطول الزمكاني OA لخط الساعة الكوني الرقمية الثابتة عند نقطة أصل S هو $s = ct$ ؛ مما يعنى أن الزمن الحقيقي بين الحدثين O و A هو $t = 5s$. ويكون للطول الزمكاني OA في S' كلتا المركبتين

الزمانية والمكانية، مما يعني أن مراقب 'S لا يقيس الزمن الحقيقي بين الحدثين O و A على طول ساعة S. ما يقيسه هو الزمن الظاهري أو المتمدد بين نفس الحدثين – ويجد أن الحدث 'A الواقع على خط كوني لساعة 'S يكون متزامناً(*) مع A، ويستنتج، بناءً على أن الحدث 'A هو ساعة 'S الرقمية الموجودة عند الثانية السادسة من تاريخها، أن الفترة الزمنية بين O و A كما عُيِّنَت في 'S هي $t' = 6s$.

يتَّخذ مراقب S نفس الإجراء عندما يريد تعيين الفترة الزمنية بين الحدثين O و'B في S؛ الزمن الحقيقي بين هذين الحدثين كما عُيِّنا في 'S هو $t' = 5s$. يجد مراقب S أن الحدث B متزامن مع 'B ويستنتج أن الفترة الزمنية بين O و'B كما قيست في S هي $t' = 6s$. يقيس كل من المراقبين خمس ثوان في إطار إسناده، ولكن عندما ينظر إلى قياس المراقب الآخر يقر بأن الزمن في إطار الإسناد الآخر يبدو متمددًا. يوضح شكل ٤,١٩ أنه لا يحدث شيء لزمني كل من المراقبين التدريج على طول خطي كون الساعتين يكون متماثلاً بالنسبة لكلا المراقبَين، مما يعني أن خمس ثوان من الزمن الحقيقي في S تكون مساوية لخمس ثوان من الزمن الحقيقي في 'S. بطريقة أخرى، الزمن الحقيقي يكون لامتغيِّرًا، لأنه متناسب مع الطول الزمكاني $s = ct$ لخط كوني شبه زمني.

(*) يقر مراقب 'S أن 'A متزامن مع A ليس لشيء إلا لأن A يقع في الفضاء اللحظي ثلاثي الأبعاد المناظر للحدث 'A. فهو *يُسقط* الحدث A فوق الحدث 'A.



شكل ٤,١٩ تمدد الزمن تبادلي

توفر تبادلية تأثير تمدد الزمن فرصة رائعة لتوجيه السؤال الأساسي: هل خطًّا كون الساعة جسمان واقعيان رباعيا الأبعاد أم أنهما ليسا أكثر من مجرد تمثيلات بيانية سهلة لنتائج النسبية الخاصة؟ سوف نتعرض لهذا السؤال بتفصيل أكثر في الفصل الخامس، ولكن يمكننا هنا أن نرى هل من الممكن أن يكون تأثير تمدد الزمن تبادليًا إذا افترضنا أن الخطين الكونيين ليسا جسمين واقعيين رباعي الأبعاد، مما يعني أن كلاً من الساعتين موجودة فقط عند لحظة واحدة من تاريخها.

٤,٥ تقلّص الطول في الفضاء الإقليدي وفي الزمكان

لقد استنتجنا العلاقة بين المركبات "الرأسية" لطول معين كما هو محدد في نظامين للإحداثيات في الفضاء الإقليدي وفي إطاري إسناد قصوريين في الزمكان. من الطبيعي إلى حد كبير الآن أن نسأل ماذا تكون العلاقة بين المركبة "الأفقية" لطول في الفضاء الإقليدي وفي الزمكان. كما فعلنا في حالة تأثير تمدد الزمن، هنا أيضًا سوف نستنتج أولاً تلك العلاقة في الفضاء الإقليدي ثم نترجمها لكي نحصل على العلاقة المناظرة في الزمكان، المعروفة باسم تقلّص الطول. على الرغم من ذلك، يتضح أن تقلّص الطول يكون أكثر غموضًا من تمدد الزمن. للأسف، فإن هذا الغموض لم تتعرض إليه كتب النسبية الخاصة.

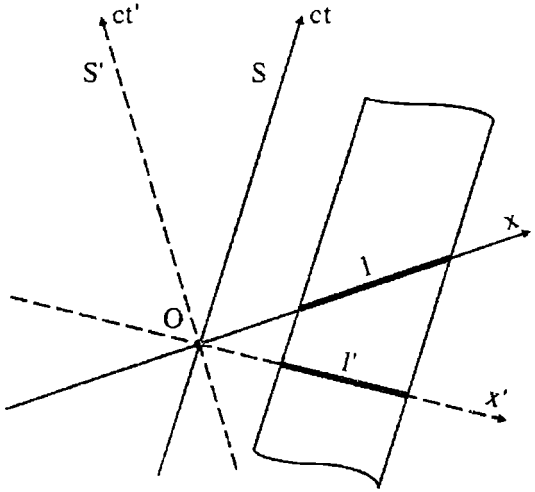
في تأثير تمدد الزمن يقيس مراقبان في حالة حركة نسبية مركبة الزمن لنفس الخط الكوني شبه الزمني، ليكن هو الطول OA في شكل ٤,١٨. يقيس أحد المراقبين الطول الصحيح للخط الكوني لأن محور زمن إطار إسناد المراقب تم اختياره على طول الخط الكوني، وتشكل OA جزءا منه؛ بذلك يكون لمراقب OA بالنسبة لهذا المراقب لديه فقط مركبة زمن، والتي أسميناها الزمن الحقيقي. في إطار إسناد المراقب الآخر، فيكون OA لديه كلتا المركبتين الزمانية والمكانية. في تأثير تقلّص الطول نرغب في تعيين طول نفس القضيب كما قاسه مراقبان في حالة حركة نسبية. افترض أن القضيب في حالة سكون في إطار الإسناد القصوري $\dot{S}$ ويقع على طول المحور x. يسمى طوله $l = 1\,\mathrm{m}$ هناك بالطول الحقيقي. يكون للقضيب فقط مركبة "أفقية"، أيْ مكانية في S. ولا يكون لديه مركبة زمانية لأن جميع أجزائه توجد بالتزامن عند أي لحظة من تاريخ القضيب. بعبارة أخرى، حسب الرؤية البُعْدِيَّة الثلاثية ، يعطى الطول الكامل للقضيب دفعة واحدة عند لحظة

واحدة فقط من تاريخه، أيْ اللحظة الحاضرة؛ إذا وُجد القضيب عند لحظات أكثر في نفس الوقت (وليس عند مجرد لحظة واحدة) فإنه لن يكون ثلاثي الأبعاد وإنما رباعي الأبعاد، كما هو مبين في شكل ٤,١ ب لحالة ساعة رقمية. إذًا فإن الجسم ثلاثي الأبعاد يوجد بالتعاقب عند جميع لحظات تاريخه ولكنه لا يوجد أبدًا عند أكثر من لحظة مفردة في نفس الوقت. الجسم الممتد ثلاثي الأبعاد يعطى بالكامل طبقًا للتعريف عند لحظة واحدة من تاريخه، مما يعني أن أجزاءه توجد بالتزامن عند تلك اللحظة.

عندما يحدد مراقب في إطار إسناد قصوري آخر 'S متحركًا بحركة نسبية مع S (على طول المحور x) أن طول نفس القضيب يكون أقصر في 'S، ينبغي أيضًا أن يقيسه عند لحظة واحدة في 'S؛ بمعنى أن، جميع أجزاء القضيب يجب أن تكون موجودة بالتزامن في 'S عند أي لحظة من تاريخه. وهذا يعني أنه ينبغي ألا يكون للقضيب أيضًا مركبة زمن في 'S.(*) هذا المتطلب مذكور في جميع استنتاجات تقلّص الطول في كتب النسبية. لكن ما لم يتم التعرض له هو حقيقة أن نفس القضيب ثلاثي الأبعاد لا يمكنه الوجود في أكثر من إطار إسناد واحد. القضيب يكون جسمًا ثلاثي الأبعاد ممتدًا، وبالتالي تكون أجزاؤه ثلاثية الأبعاد موجودة بالتزامن عند لحظة معينة. ومن ثم، نظرًا لنسبية التزامن، لا يمكن للقضيب الوجود في إطاري إسناد في حالة حركة نسبية لأن مجموعات مختلفة من الأحداث تكون متزامنة في إطاري الإسناد.

(*) هنا يكمن الفرق بين تمدد الزمن وتقلّص الطول. كما هو مبين في شكل ٤,١٨، يكون للطول شبه الزمني OA مركبة مكانية في 'S. في تأثير تقلّص الطول ينبغي أن يكون للقضيب مركبات مكانية فقط في كل من S و'S.

جوهر الحقيقة التي تفيد بأن المراقب في 'S يقيس بالفعل الطول (المتقلص) للقضيب له تفسير واحد فقط – هو أن مراقب 'S لا يقيس نفس القضيب ثلاثي الأبعاد – فهو يقيس جسمًا مختلفًا ثلاثي الأبعاد. يبدو هذا هراء تمامًا لأن القضيب طبقًا للتعريف يكون واحدًا. لقد رأينا أن فريق البحث الجذري لا يمكنه التأثر بالمفارقات الظاهرة. لقد اكتسبوا الاعتياد على استخدام أسلوب الموافقة المؤقتة على وجهة النظر الشائعة. لذا فإنهم يستطيعون أن يقولوا: "دعونا نفترض ما يبدو أنه واضح تمامًا – أي أن مراقبين في حالة حركة نسبية يقيسان نفس القضيب." لأن جميع أجزاء القضيب الممتد تكون موجودة بالتزامن عند أي لحظة من تاريخه، ينتج من ذلك لا محالة أن نسبية التزامن ستكون مستحيلة، لأنه قد يكون لكلا مراقبَي S و'S نفس مجموعة الأحداث المتزامنة – نفس القضيب الممتد ثلاثي الأبعاد.



شكل ٤,٢٠ المعنى الفيزيائي لتقلّص الطول يكون غير هندسي نوعًا ما – لا يقيس مراقبَان في حالة حركة نسبية نفس القضيب ثلاثي الأبعاد، لأن فضائيْ S و'S ثلاثي الأبعاد يقطعان خط القضيب الكوني في مقطعين مختلفين عرضيين ثلاثيي الأبعاد، يشاهد المراقبَان كلاً منهما على أنه قضيبه.

إن قياس المراقبَين لقضيبين مختلفين ثلاثيي الأبعاد ينتج من نسبية التزامن – بأن يكون القضيب جسمًا ممتدًا، مما يعني أن أجزاءه موجودة بالتزامن عند لحظة معينة من زمن مراقب ماء إذا قاس مراقبَان في حالة حركة نسبية نفس القضيب، فإن هذا يعني أن التزامن سيكون مشتركًا بالنسبة لهما، وبالتالي سيكون مطلقًا.

هذا التناقض الظاهري يكون مشجعًا لفريق البحث الجذري. فهو يؤيد بوضوح رؤيتهم بأن الزمكان واقعي. في كون رباعي الأبعاد يكون القضيب جسمًا رباعي الأبعاد، وهو خط القضيب الكوني. يقطع الفضاءان ثلاثيا الأبعاد لمراقبَي S و'S الخط الكوني في أماكن مختلفة، كما هو مبين في شكل ٤,٢٠، ويفسِّر المقطعان العرضيان ثلاثيا الأبعاد بواسطة مراقبَي S و'S على أنهما قضيبان مختلفان ثلاثيا الأبعاد. وهذا يفسر ليس فقط لماذا يقيس مراقبَا S و'S قضيبين مختلفين ثلاثيي الأبعاد، وإنما أيضًا لماذا يكون طولهما مختلفًا – وذلك لأن فضائيْ S و'S ثلاثيي الأبعاد يقطعان خط القضيب الكوني عند زاويتين مختلفتين، والمقطعان العرضيان الناتجان يكونان بالتالي مختلفين في الطول.

صحيح أن القضيب، طبقًا للتعريف، يكون جسمًا واحدًا، ولكن هذا الجسم هو خط القضيب الكوني رباعي الأبعاد. وصحيح أيضًا أن مراقبَي S و'S يقيسان قضيبين مختلفين ثلاثيي الأبعاد، ولكنهما مجرد مقطعين عرضيين ثلاثيي الأبعاد لخط القضيب الكوني. الاستنتاج بأنه، أثناء قياس نفس القضيب، يقيس مراقبان في حالة حركة نسبية جسمين مختلفين ثلاثيي الأبعاد ينتج في الواقع مباشرة من الفرضية الأساسية لفريق البحث الجذري بأن المراقبَين لهما فضاءان مختلفان ثلاثيا الأبعاد، وبالتالي جسمان مختلفان ثلاثيا الأبعاد.

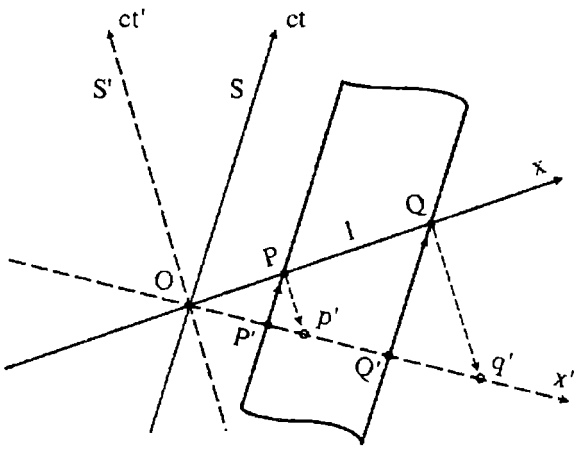
الدور الآن على فريق البحث التقليدي في ألاَّ يتأثروا بالتحليل المفاهيمي لتقلّص الطول الذي أجراه فريق البحث الجذري. فهم يخبرون منافسيهم بأن ما ينبغي على عالم الفيزياء فعله هو استنتاج تقلّص الطول من تحويلات لورنتز مع عدم الاهتمام بالأسئلة المفاهيمية والتفسيرية. هذه هي اللحظة التي كان ينتظرها أعضاء الفريق الجذري: "ممتاز! كان تطبيق تحويلات لورنتز هو بالضبط ما جعلنا نحلل المعنى الفيزيائي لتعيين الطول لأجسام ثلاثية الأبعاد داخل إطاري إسناد في حالة حركة نسبية." ثم يوضحون ما يقصدونه لزملائهم التقليديين. يكون القضيب ساكنًا في S ويكون الإحداثيان x_P وx_Q لنقطتي نهايته معلومين في S (شكل ٤,٢١). هذا يعني أن طوله $l = x_Q - x_P$ يكون معلومًا أيضًا في S.

عند الحدث O، عندما تتطابق لحظيًا نقطتا أصل S و'S ، يقرر مراقب 'S أن يعين طول القضيب في 'S. كما في حالة تمدد الزمن، يعتزم إجراء التحويل $S \to S'$، لأنه يريد استخدام الإحداثيين المعلومين x_P وx_Q في إيجاد الإحداثيين المجهولين $x'_{P'}$ و $x'_{Q'}$ لنقطتي نهاية القضيب في 'S؛ لقد حصل على علاقة تمدد الزمن تمامًا بنفس الطريقة. إذًا تحويل لورنتز (٤,٧) بين x و'x يعطي

$$x'_{Q'} - x'_{P'} = \frac{x_Q - x_P}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.16)$$

أخذنا في الاعتبار هنا حقيقة أن الحدثين P و Q لهما نفس مركبتي الزمن في S. عندما استنتج فريق البحث الجذري المعادلة (٤,١٦) ونظروا إلى رسم الزمكان التوضيحي المبين في شكل ٤,٢١، أدركوا أن فرضيتهم

الرئيسية بأن الزمكان واقعي كانت في مـأزق. حيـث إن القـضيب يمثـل في الزمكان بأنبوبه الكوني رباعي الأبعاد، يقطع فضاءا S و'S ثلاثيا الأبعاد الأنبوب الكوني في المقطعين العرضيين ثلاثيـي الأبعـاد PQ و'P'Q، علـى التوالي. لهذا توقع باحثو الفريق الجذري أن يُسقط تحويل لـورنتز $S \to S'$ الحدثين P وQ فوق الحدثين 'P و'Q. على الرغم من ذلـك، أسـقط $S \to S'$ الحدثين P وQ فوق 'p و'q. إذا نُظر للمسافة 'p'q على أنها الطول 'l للقـضيب في 'S (وهو ما يمكن اعتباره لأن 'p و'q يكونان متزامنين فـي 'S)، إذًا قـد يكون قياس الأطوال في S و'S مشابهًا لتأثير تمدد الزمن: قد يكون الطـول الظاهري 'l أكبر من الطول الحقيقي l. قد تبين التجربة فيما بعـد أنـه فـي الواقع يكون $l' < l$، ولكن لم يستطع باحثو الفريق الجـذري اسـتخدام ذلـك الدليل في تحليلهم؛ كانوا مستمرين في محاولة استنتاج تنبؤات من فرضـيتهم الرئيسية بأن الزمكان واقعي، والتي يمكن اختبارها تجريبيًا.



شكل ٤,٢١ تقلّص الطول أكثر غموضًا من تمدد الزمن

أول شيء يتأكد منه أعضاء فريق البحث الجذري هو ما إذا كانوا قد استخدموا تحويل لورنتز السليم. يبدو بالفعل التحويل $S \to S'$ هو ما يجب استخدامه لأنه يعبر عن الإحداثيين المجهولين لنقطتي نهاية القضيب في S. والأكثر من ذلك أن هذا التحويل نجح على نحو تام في حالة تمدد الزمن.(*) يبدءون عند هذه المرحلة في تحليل المعنى الفيزيائي لقياس الطول، أولاً في إطار إسناد واحد وبعد ذلك في في إطارين في حالة حركة نسبية. كما رأينا أعلاه قادهما هذا التحليل إلى الاستنتاج بأن القضيب لديه فقط مركبات مكانية في كلٍ من S و 'S . مع أنه في استنتاجات تأثير تقلّص الطول في كتب النسبية ذكر صراحة أن طول القضيب قيس بالتزامن في كل من الإطارين S و'S ، ولم يُفسَّر أن المعنى الفيزيائي لهذا المطلب هو أن مراقبَي S و'S يقيسان قضيبين مختلفين ثلاثيي الأبعاد. يتحدى باحثو الفريق الجذري زملاءهم التقليديين أن يجدوا خطأً في تحليلهم. القراء مدعوون لأن يجربوا بأنفسهم، لكي يفهموا لماذا يكون الباحثون الجذريون لديهم ثقة شديدة بنتائجهم.

في البداية، فرضية أن تحويل لورنتز $S \to S'$ هو التحويل السليم الذي يجب استخدامه أظهرت أنها تتعارض مع الرؤية البُعْدِيّة الرباعية، وبتحديد أكثر مع لازِمَتِها بأن الأنبوب الكوني للقضيب هو جسم واقعي رباعي الأبعاد. الآن حقيقة أن التحويل السليم(**) $S \to S'$ لا يعكس بصورة كافية

(*) إذا كان الطول PQ جزءًا من خط كوني شبه فضائي، عندئذ قد يكون تحويل لورنتز $S \to S'$ هو التحويل السليم لأن مراقب S سوف يقيس الطول الصحيح PQ، بينما سيعين مراقب 'S المركبة "الأفقية" (المكانية) $p'q'$ للطول PQ. لكن طول القضيب PQ (أيْ القضيب ثلاثي الأبعاد نفسه) ليس جزءًا من خط كوني شبه فضائي (مع أن المسافة PQ هي شبه فضائية)؛ لو كان هذا هو الحال لما استمر القضيب في الزمن وإنما كان سيظهر عند لحظة واحدة فقط ثم يختفي بعدها إلى الأبد.

(**) هو التحويل السليم بمعنى أنه يعبر عن الإحداثيين المجهولين في 'S كدالة في إحداثييه المعلومين في S.

قياس طول القضيب في إطاري إسناد في حالة حركة نسبية تشكل جدلاً قويًا لصالح واقعية الزمكان. كما هو مبين في شكل ٤,٢١، يشاهد مراقب S المقطع العرضي ثلاثي الأبعاد PQ وكأنه قضيبه، بينما يكون المقطع العرضي P'Q' هو القضيب ثلاثي الأبعاد المقاس بواسطة مراقب 'S. تحويل لورنتز الذي يربط بين المقطعين العرضيين هو $S \to S'$، لأنه يُسقط الحدثين P' وQ' فوق P وQ، كما هو مبين في شكل ٤,٢١. التحويل $S \to S'$ لإحداثيات x هو

$$x = \frac{x' + \beta ct'}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.17)$$

باستخدام ذلك، نحصل على

$$x_P - x_Q = \frac{x'_{Q'} - x'_{P'}}{(1-\beta^2)^{1/2}} .$$

من هنا يمكننا تعيين طول القضيب $l' = x'_{Q'} - x'_{P'}$ في 'S

$$x'_{Q'} - x'_{P'} = (x_Q - x_P)(1-\beta^2)^{1/2} ,$$

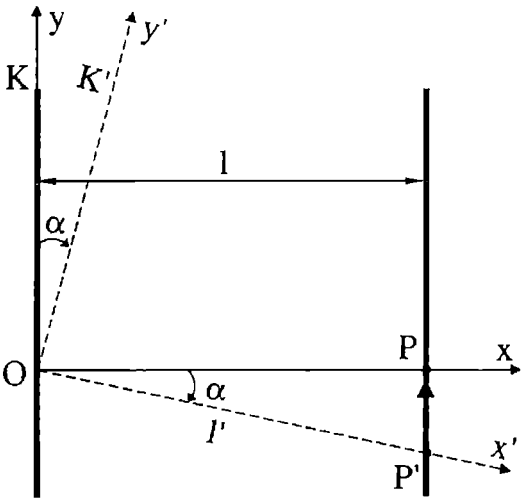
أو (بالأخذ في الاعتبار حقيقة أن $l = x_Q - x_P$)

$$l' = l(1-\beta^2)^{1/2} . \qquad (4.18)$$

لقد حصلنا على طول القضيب المتقلص (٤,١٨) كما عُيِّن في 'S باستخدام التحويل $S \to S'$. يوضح التطبيق الغير معتاد(*) لهذا التحويل أنه يربط بين طولي قضيبين مختلفين ثلاثيي الأبعاد، ويبدو ممكنًا فقط في كون رباعي الأبعاد (نعود لهذه القضية في الفصل الخامس).

(*) غير معتاد لأنه يحول الإحداثيين المجهولين $x'_{P'}$ و $x'_{Q'}$ إلى الإحداثيين المعلومين x_P و x_Q.

دعنا نتتبع بإيجاز فريق البحث الجذري في ترجمتهم لتأثير تقلّص الطول كما عُرِّف في الفضاء الإقليدي إلى التأثير المناظر في الزمكان. الشريط المحدد بالخطين الرأسيين السميكين في شكل ٤,٢٢ له طول أفقي l في نظام الإحداثيات K. الطول "الأفقي" للشريط في K' هو l'. حقيقة أن مراقبَي K و K' يقيسان طولين مختلفين، ويكونان مقطعين عرضيين مختلفين من محوري x و x' والشريط، لا تفاجئ أحدًا في الحالة الإقليدية. ولكن لو أن الزمكان واقعي، وأن أنابيب الكون للأجسام الفيزيائية أجسام واقعية رباعية الأبعاد، عندها لكان هناك نظير للموقف الإقليدي، مبينة في شكل ٤,٢٢، موجودة لا محالة عندما يقيس مراقبان مختلفان وفي حالة حركة نسبية طول نفس الجسم الفيزيائي.



شكل ٤,٢٢ "تقلص" الطول في فضاء إقليدي

تكون العلاقة الإقليدية بين l و l' واضحة على الصورة:

$$l = l'\cos\alpha = \frac{l'}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}} ;$$

والتي يمكن كتابتها على الصورة

$$l' = l(1+\tan^2\alpha)^{1/2}. \qquad (4.19)$$

كما يظهر من (٤,١٩)، في الفضاء الإقليدي، يكون تقلّص الطول هو في الواقع عبارة عن تمدد للطول. وهذا ليس مدهشاً. وكما ناقشنا أعلاه، الطبيعة الإقليدية الزائفة للزمكان تكون مسؤولة عن تلك التضاربات.

لقد حصلنا على المعادلة (٤,١٩) مباشرة، ولكن يستطيع القارئ أن يتأكد من أنه يمكنه الحصول عليها، ليس بواسطة ما يبدو من أنه التحويل السليم $K \to K'$ [لأنه يعبر عن إحداثيي P' المجهولين في K' بدلالة إحداثيي P المعلومين في K؛ إحداثيا O هما (0,0) في كل من K و'K]، وإنما بواسطة التحويل $K' \to K$. التحويل $K' \to K$ هو فقط ما يربط بين الطولين OP و'OP.

النظير الإقليدي لتأثير "تقلص" الطول (٤,١٩) يمكن ترجمته إلى تأثير الزمكان المناظر مرة أخرى باستخدام التعويض (٤,٤). لاحظ أن $l = \Delta x$ و $l' = \Delta x'$، تم استبدال $i\Delta x$ و $i\Delta x'$ مكانهما، واستبدل $i\beta$ مكان $\tan\alpha$. تكون النتيجة

$$\mathrm{i}\left[\Delta x' = \Delta x(1-\beta^2)^{1/2}\right].$$

بتطبيق القاعدة لتفسير المعادلات الحقيقية فقط بين القوسين بعد الوحدة التخيلية وكتابة هذه العلاقة بدلالة l و l'، نحصل على

$$l' = l(1-\beta^2)^{1/2}\,.$$

تدعم هذه النتيجة بصورة أفضل توقعات أعضاء فريق البحث الجذري بأنه، عن طريق تحويل علاقات هندسية بسيطة في الفضاء الإقليدي، سيكون باستطاعتهم استنتاج تنبؤات يمكن استخدامها لاختبار واقعية الزمكان تجريبيًا. وقد يبهجهم ذات يوم قراءة ما كتبه هيرمان مينكوفسكي، باحث جذري آخر [١١، ص ٧٦]:

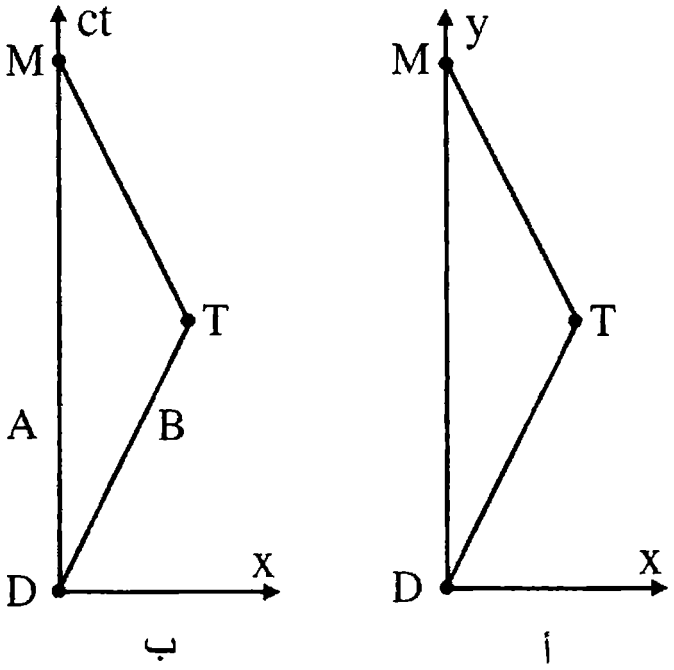
يُعتقد أن الكون بأكمله يحلل نفسه إلى خطوط كونية، وأجد نفسي راضيًا بالقول – فيما أرى – بأن القوانين الفيزيائية ربما تجد صياغتها بالغة الإتقان في صورة علاقات تبادلية بين هذه الخطوط الكونية.

٤,٦ مفارقة التوأم في الفضاء الإقليدي وفي الزمكان

لقد نجح باحثو الفريق الجذري في استنتاج تنبؤين – هما تأثيرا تمدد الزمن وتقلّص الطول – يكونان من وجهة نظرهما مظهرًا مؤيدًا لواقعية الزمكان. يمكن صياغة كلا التأثيرين فقط عند إدخال إطاري إسناد يعَرِّفان فضاءين ثلاثيي الأبعاد واتجاهي زمن. وحيث إن الزمكان نفسه لا ينقسم موضوعيًا إلى زمان ومكان، فإن هذين التأثيرين غير موجودين موضوعيًا – فلا توجد أفضية ثلاثية الأبعاد منفصلة في الزمكان تقطع أنابيب الأجسام الفيزيائية الكونية، وبالتالي تتسبب في تمدد الزمن وتقلّص الطول؛ لا يوجد هناك غير أنابيب كونية.(*)

(*) على الرغم من ذلك، إذا ما وصفنا الزمكان بلغة الأبعاد الثلاثية العادية عن طريق إدخال أطر إسناد، فإنه يمكن اختبار التأثيرين تجريبيًا لأن وجودهما الحتمي يوضح أن الكون الموضوعي ليس هو كون تصوراتنا ثلاثي الأبعاد. لو أن الكون الموضوعي كان بالفعل ثلاثي الأبعاد، لما كان هناك تلك التأثيرات مثل تمدد الزمن وتقلص الطول. سيكون مفيدًا حقًا من أجل فهم أصيل للحجج المعروضة في هذا الكتاب أن يحاول القارئ دحض كل جملة مثل هذا القبيل.

لقد أدرك الباحثون الجذريون أثناء بحثهم عن علاقات بين خطوط في الفضاء الإقليدي يمكن ترجمتها إلى علاقات مناظرة بين خطوط كونية في الزمكان أن متباينة المثلث (مجموع طولي أي ضلعين من أضلاع المثلث أكبر من طول الضلع الثالث) تشكل علاقة بين خطوط لا تحتاج إلى إدخال نظام إحداثيات أو أُطر إسناد لكي تكون موجودة. يُصَوِّر شكل ٤,٢٣ أ مثلثًا في الفضاء الإقليدي العادي. من الواضح أن مجموع طولي الضلعين DT وTM أكبر من طول الضلع الثالث DM. بعبارة أخرى، في الفضاء الإقليدي، تكون أقصر مسافة بين نقطتين هي على طول الخط المستقيم الواصل بين النقطتين – أقصر مسافة بين D وM في شكل ٤,٢٣ أ تكون على طول الخط المستقيم DM.

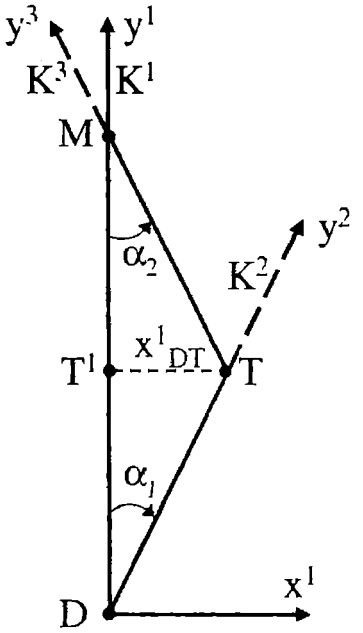


شكل ٤,٢٣ مفارقة التوأم في الفضاء الإقليدي (أ) وفي الزمكان (ب)

شكل ٤,٢٣ ب يبين مثلثًا في الزمكان ربما تكون خطوطه هي خطوط كونية لأجسام فيزيائية. افترض أن الخطوط الكونية تلك تمثل توأمين A وB. الخط الكوني المستقيم DM هو خط التوأم A الكوني الذي لا يغير حالة حركته، بينما الخطان الكونيان DT وTM ينتميان إلى خط التوأم B الكوني الذي يبدأ رحلة ذهاب وعودة عند حدث الإقلاع D، ويستدير ليعود إلى الخلف بعد بعض من الوقت عند الحدث T، ويقابل أخاه عند الحدث M.(*) واضح من الرسم التوضيحي للزمكان أن الخطين الكونيين للتوأمين بين D وM مختلفان. وهذا يعني أن كميتين مختلفتين من زمنيهما الحقيقيين ستكونان قد انقضتا عندما يتقابلان عند M، لأن طولي خطي كون التوأمين متناسبان مع زمنيهما الحقيقيين. لقد طور بالفعل أعضاء فريق البحث الجذري حدسًا إقليديًا زائفًا ويتوقعون أن تكون متباينة المثلث في الزمكان مختلفة عنها في الفضاء الإقليدي. يخبرهم حدسهم أنه، على النقيض من الحالة الإقليدية، قد يكون أطول مسار بين حدثين في الزمكان على طول الخط الكوني الواصل بينهما. وحيث إن مفارقة التوأم لها أهمية خاصة للباحثين الجذريين، وذلك لأنها تأثير موضوعي وبهذا المعنى يكون تأثيرًا *مطلقًا* (موجودًا بدون إدخال أُطر إسناد)، فيقررون إجراء الحسابات للمثلث الإقليدي رغم وضوحه وعندئذ:

- يترجمون المعادلة التي تم الحصول عليها في الفضاء الإقليدي إلى معادلة الزمكان المناظرة.
- يتَّبعون نفس الإجراءات المستخدمة في الحالة الإقليدية لتحليل التأثير في الزمكان نفسه.

(*) في الفصل الخامس، سوف نقوم بإجراء تحليل مفاهيمي لمفارقة التوأم في محاولة لاكتساب تبصر أعمق داخل معناها الفيزيائي.



شكل ٤,٢٤ مفارقة التوأم في فضاء إقليدي

لمقارنة أطوال أضلاع المثلث سوف نختار ثلاثة أنظمة للإحداثيات،(*) K^1، K^2، و K^3، والتي تكون محاورها الصادية y على طول DM، DT، وTM، للمثلث، على التوالي، كما هو مبين في شكل ٤,٢٤. للحصول على متباينة المثلث في فضاء إقليدي، سوف نستفيد من لاتغيُّر المسافة الإقليدية.

(*) لاحظ أننا نحتاج إلى أنظمة الإحداثيات فقط لحساب العلاقة بين أضلاع المثلث. حقيقة أن مجموع طولي ضلعين من المثلث أكبر من طول الضلع الثالث لا تعتمد على إدخال أي أنظمة إحداثيات. تذكر أن تأثيرَيْ "التمدد" الصادي و"تقلص" الطول في الفضاء الإقليدي يمكن تعريفهما فقط بدلالة نظامين للإحداثيات؛ ليس لهما معنى مستقل في الفضاء الإقليدي بدون إدخال أنظمة إحداثيات.

دعنا نحدد العلاقة بين أضلاع المثلث في نظام إحداثيات K'. بما أن الضلع DM له فقط مركبة y، فإنه من الواضح أن طوله l^1_{DM} يساوي y^1_{DM}. ويكون لطول الضلع DT كلتا المركبتين x و y في K':

$$l^1_{DT} = \left[(y^1_{DT'})^2 + (x^1_{DT})^2\right]^{1/2} = y^1_{DT'}(1+\tan^2\alpha_1)^{1/2}.$$

بالأخذ في الاعتبار حقيقة أن $l^1_{DT'} = y^1_{DT'}$، يمكننا كتابة

$$l^1_{DT'} = \frac{l^1_{DT}}{(1+\tan^2\alpha_1)^{1/2}}.$$

بنفس الطريقة، نحصل على

$$l^1_{T'M} = \frac{l^1_{TM}}{(1+\tan^2\alpha_2)^{1/2}}.$$

نظرًا لأن $l^1_{DM} = l^1_{DT'} + l^1_{T'M}$، تكون العلاقة بين أطوال الأضلاع الثلاثة للمثلث هي

$$l^1_{DM} = \frac{l^1_{DT}}{(1+\tan^2\alpha_1)^{1/2}} + \frac{l^1_{TM}}{(1+\tan^2\alpha_2)^{1/2}}. \qquad (4.20)$$

إن متباينة المثلث

$$l^1_{DM} \le l^1_{DT} + l^1_{TM}$$

متضمَّنة في (٤,٢٠)، لأن الحد الأول في (٤,٢٠) أصغر من l^1_{DT} (حيث $\tan^2\alpha_1 > 0$ لكل $\alpha_1 \neq 0$) والحد الثاني أصغر من l^1_{TM} (حيث $\tan^2\alpha_2 > 0$ لكل $\alpha_2 \neq 0$). بل إن متباينة المثلث تصبح أكثر وضوحًا إذا ما اخترنا $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$:

$$l^1_{DM} = \frac{l^1_{DT} + l^1_{TM}}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}} \,. \qquad (4.21)$$

والتي يمكن كتابتها على الصورة

$$l^1_{DM}(1+\tan^2\alpha)^{1/2} = l^1_{DT} + l^1_{TM} \,.$$

إذا كان $\alpha = 0$، تصبح المتباينة متساوية، لأنه في هذه الحالة يكون $l^1_{DT} = l^1_{D'T'}$ و $l^1_{TM} = l^1_{T'M}$.

من أجل تحويل العلاقة (٤,٢١) إلى علاقة الزمكان، يمكن كتابتها بدلالة مركبات y لأضلاع المثلث في أنظمة الإحداثيات الثلاثة. لكي نفعل هذا، نستخدم لامتغير الطول الإقليدي. في K^1 يكون طولا الضلعين DT وTM هما l^1_{DT} و l^1_{TM}، على التوالي. في K^2 يكون طول DT هو $l^2_{DT} = y^2_{DT}$ وبما أن $l^1_{DT} = l^2_{DT}$ إذاً يمكننا كتابة $l^1_{DT} = y^2_{DT}$. في K^3 يكون طول الضلع TM هو $l^3_{TM} = y^3_{TM}$ وبالتالي يكون $l^1_{TM} = y^3_{TM}$. يمكننا الآن كتابة (٤,٢١) باستخدام فقط مركبات y لأضلاع المثلث في K^1، و K^2، و K^3:

$$y^1_{DM} = \frac{y^2_{DT} + y^3_{TM}}{(1+\tan^2\alpha)^{1/2}} \,. \qquad (4.22)$$

لاحظ أن (٤,٢٢) تربط بين الارتفاعات الحقيقية للأضلاع الثلاثة كما عُيِّنَت في نظام إحداثياتها الذي فيه يكون لها فقط مركبات رأسية أو صادية؛ لكنها ليست الارتفاعات الظاهرية أو *الإسقاطات* الصادية كما هو الحال في التمدد الصادي في الفضاء الإقليدي.

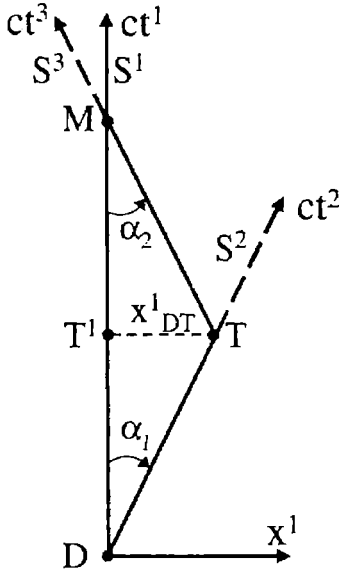
الخطوط الكونية لتوأمين A وB مُوضحة في شكل ٤,٢٥. وكما هو في الحالة الإقليدية، نقوم هنا أيضًا بإدخال ثلاثة أُطر إسناد، يكون S^1 مصاحبًا للتوأم A، و S^2 للتوأم B وهو في طريقه باتجاه نقطة الاستدارة (الحدث T) (أيْ مصاحبًا للجزء DT من خطه الكوني)، و S^3 للتوأم B وهو في طريقه عائدًا إلى التوأم A (أيْ مصاحبًا للخط الكوني TM). يكون محور الزمن في S^1 على طول الخط الكوني DM للتوأم A، مما يعني أن طوله الزمكاني هناك هو $s^1_{DM} = ct^1_{DM}$، حيث t^1_{DM} هو الزمن الحقيقي بين الحدثين D وM. يكون الطول الزمكاني للخط الكوني DT للتوأم B في S^2 هو $s^2 = ct^2_{DT}$، حيث t^2_{DT} هو الزمن الحقيقي بين الحدثين D وT. الطول الزمكاني في S^3 للجزء الآخر TM من خط التوأم B الكوني هو $s^3 = ct^3_{TM}$، حيث t^3_{TM} هو الزمن الحقيقي بين الحدثين T وM.

لتحويل العلاقة الإقليدية (٤,٢٢) بين أضلاع المثلث في شكل ٤,٢٤، نستخدم التعويض $y \to ct$ و $\tan\alpha \to i\beta$ مرة أخرى:

$$ct^1_{DM} = \frac{ct^2_{DT} + ct^3_{TM}}{(1-\beta^2)^{1/2}},$$

أو بدلالة الأزمنة الحقيقية t^1_{DM} و t^2_{DT} و t^3_{TM} وحدها،

$$t^1_{DM} = \frac{t^2_{DT} + t^3_{TM}}{(1-\beta^2)^{1/2}}. \qquad (4.23)$$



شكل ٤,٢٥ مفارقة التوأم في الزمكان

لاحظ أن هذه العلاقة تكون بين أزمنة حقيقية، وليس بين أزمنة حقيقية ومتمددة، كما كان الحال في تأثير تمدد الزمن. يبين تأثير الزمن (٤,٢٣)، المعروف بمفارقة التوأم، أنه عندما يتقابل التوأمان عند الحدث M سوف تُبين ساعتاهما أوقاتًا مختلفة.(*) سوف تبين ساعة التوأم B أن الفترة المستغرقة في رحلته للذهاب والعودة كانت $t^2_{DT}+t^3_{TM}$، بينما طبقًا لساعة التوأم A فإن رحلة التوأم B قد استغرقت وقتًا *أطول* تُعطى مدته بالعلاقة (٤,٢٣). إن هذا لتأثير *مطلق* (وليس تبادليًا) لأن كلا التوأمين يتفقان عندما يتقابلان عند M على أن التوأم B أصغر.

(*) إن هذه هي النسخة العيارية من مفارقة التوأم التي يكون فيها مقدار السرعة النسبية بين A وB أثناء كلا الجزأين من رحلة B (عندما يبتعد عن A ويعود مرة أخرى إلى A) كما هو.

كما توقع باحثو الفريق الجذري، تكون متباينة المثلث في الزمكان معكوسة:

$$t^1_{DM} \geq t^2_{DT} + t^3_{TM} .$$

لكي نرى ذلك بصورة أفضل دعنا نكتب (٤,٢٣) على الصورة

$$t^1_{DM}(1-\beta^2)^{1/2} = t^2_{DT} + t^3_{TM} . \qquad (4.24)$$

من الواضح أن t^1_{DM} أكبر من مجموع t^2_{DT} و t^3_{TM}؛ يكون t^1_{DM} مساويًا لمجموع t^2_{DT} و t^3_{TM} فقط عندما يكون التوأمان في حالة سكون بالنسبة لبعضهما (أيْ عندما يكون $\beta = v/c = 0$). تبين متباينة المثلث (٤,٢٣) أنه، في الهندسة الإقليدية الزائفة للزمكان، تكون أطول مسافة زمكانية (أيْ أطول زمن حقيقي في حالة الخطوط الكونية أشباه الزمنية) بين حدثين هي التي على طول الخط الكوني المستقيم الواصل بين الحدثين. هذه نتيجة غير حدسية تمامًا ولكن قد يُكافأ الفريق الجذري على شجاعتهم الفكرية إذا أكدت التجربة تأثير مفارقة التوأم.

دعنا الآن نطبق نفس الإجراءات كما في الحالة الإقليدية ونستنتج العلاقة بين الأزمنة الحقيقية للتوأمين في الزمكان نفسه. في إطار الإسناد S^1، الذي يكون فيه التوأم A ساكنًا، يكون الطول الزمكاني لخط التوأم A الكوني بين الحدثين D و M هو $s^1_{DM} = ct^1_{DM}$. الطول الزمكاني لخط التوأم B الكوني بين الحدثين D و T لديه كلتا المركبتين الزمانية والمكانية في S^1 وبالتالي يكون

$$s^1_{DT} = \left[(ct^1_{DT'})^2 - (x^1_{DT'})^2\right]^{1/2} = ct^1_{DT'}(1-\beta_1^2)^{1/2} . \qquad (4.25)$$

حيث $\beta_1 = v_1 / c$ و $v_1 = x^1_{DT} / t^1_{DT'}$ هو مقدار السرعة النسبية بين التوأمين أثناء الجزء الأول من رحلة التوأم B، وتكون v_1 مناظرة للزاوية α_1 بين خطي كون التوأمين عند الحدث D. يجب توجيه اهتمام خاص إلى الزمن $t^1_{DT'}$. من ناحية، يكون الزمن الحقيقي هو ما بين الحدثين D وT^1، حيث T^1 متزامن مع T في S^1. ولكن من ناحية أخرى يكون هو الزمن بين D و T، وذلك كما قيس في S^1 (لقد قيس بين D وT^1، لأن T^1، متزامن مع T)؛ أيْ أنه الزمن المتمدد المناظر للزمن الحقيقي t^2_{DT} بين الحدثين D و T وذلك كما قيس في S^2.

نتيجة لاتغيُّر المسافة الزمكانية $s^1_{DT} = s^2_{DT}$ ولأن $s^2_{DT} = ct^2_{DT}$، حيث t^2_{DT} هو الزمن الحقيقي بين الحدثين D و T، وينتج من ذلك أن $s^1_{DT} = ct^2_{DT}$. عندئذ يمكننا أخذ ذلك في الاعتبار في (٤,٢٥):

$$t^2_{DT} = t^1_{DT'}(1-\beta_1^2)^{1/2} .$$

وهو ما يمكن كتابته على الصورة(*)

$$t^1_{DT'} = \frac{t^2_{DT}}{(1-\beta_1^2)^{1/2}} . \qquad (4.26)$$

إن الطول الزمكاني لخط التوأم B الكوني بين الحدثين T و M لديه أيضًا كلتا المركبتين الزمانية والمكانية فى S^1:

$$s^1_{TM} = \left[(ct^1_{T'M})^2 - (x^1_{TM})^2\right]^{1/2} = ct^1_{T'M}(1-\beta_2^2)^{1/2} . \qquad (4.27)$$

(*) يمكنك هنا التعرف على تأثير تمدد الزمن المذكور أعلاه – t^2_{DT} هو الزمن الحقيقي بين الحدثين D و T، بينما $t^1_{DT'}$ هو الزمن المتمدد بين نفس الحدثين.

حيث $\beta_2 = v_2 / c$ و $v_2 = x^1_{MT'} / t^1_{MT'}$ هو مقدار السرعة النسبية بين التوأمين أثناء الجزء الثاني من رحلة التوأم B (إن $x^1_{DT} = x^1_{TM}$ لأن الحدثين D و M لهما نفس المحور السيني x في S^1)، وتكون v_2 مناظرة للزاوية α_2 بين خطي كون التوأمين عند الحدث M.

باستخدام اللاتغير للمسافة الزمكانية $s^1_{TM} = s^3_{TM}$ مرة أخرى، ولأن $s^3_{TM} = ct^3_{TM}$، حيث t^3_{TM} هو الزمن الحقيقي بين T و M، يكون لدينا $s^1_{TM} = ct^3_{TM}$. عندئذ (٤,٢٧) تصبح:

$$ct^3_{TM} = ct^1_{T'M}(1-\beta_2^2)^{1/2} ,$$

والتي يمكن إعادة ترتيبها على الصورة

$$t^1_{T'M} = \frac{t^3_{TM}}{(1-\beta_2^2)^{1/2}} . \qquad (4.28)$$

وبما أن الزمن الحقيقي t^1_{DT} بين D و M يساوي مجموع الزمنين الحقيقيين $t^1_{DT'}$ و $t^1_{T'M}$ بين DT' و $T'M$، على التوالي، فيكون لدينا

$$t^1_{DM} = \frac{t^2_{DT}}{(1-\beta_1^2)^{1/2}} + \frac{t^3_{TM}}{(1-\beta_2^2)^{1/2}} .$$

لقد حصلنا على العلاقة بين الأزمنة الحقيقية للتوأمين بين الحدثين D و M. في حالة $\beta_1 = \beta_2 = \beta$، فإن هذه العلاقة تصبح

$$t^1_{DM} = \frac{t^2_{DT} + t^3_{TM}}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.29)$$

وهي تطابق (٤,٢٣) التي حُصل عليها عن طريق العلاقة الإقليدية المناظرة.

هنا أيضًا سوف يكون مفيدًا من أجل فهم أصيل لمعنى مفارقة التوأم افتراض أن خطي التوأمين الكونيين ليسا جسمين واقعيين رباعييْ الأبعاد ورؤية ما إذا كان هذا التأثير ممكنًا؛ سوف نفعل هذا في الفصل الخامس.

٤,٧ جمع السرعات

دعنا نرى الآن ما إذا كانت تحويلات لورنتز (٤,١١) متَّسقة مع نتيجة مبدأ النسبية القائل بثبات مقدار سرعة الضوء. لذلك علينا إثبات ما إذا كان جسيم ما متحركًا بمقدار سرعة الضوء c في الإطار S سوف يتحرك كذلك بنفس مقدار السرعة في S'.

فليكن مقدار سرعة جسيم يتحرك على طول المحور السيني x في s هو $w^x = dx/dt$؛ ويكون مقدار سرعة الجسيم في S' هو $w^{x'}$. بتطبيق تحويلات لورنتز (٤,١١) على dx' و dt'، يكون لدينا

$$w^{x'} = \frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'} = \frac{(\mathrm{d}x - \beta c\mathrm{d}t)/(1-\beta^2)^{1/2}}{(\mathrm{d}t - \beta \mathrm{d}x/c)/(1-\beta^2)^{1/2}} .$$

بقسمة كل من البسط والمقام على dt مع الأخذ في الاعتبار أن $\beta = v/c$، نجد

$$w^{x'} = \frac{w^x - v}{1 - vw^x/c^2} . \qquad (4.30)$$

هذه هي المعادلة النسبوية لجمع السرعات والتي تحل محل القاعدة الكلاسيكية $w^{x'} = w^x \pm v$.

افترض الآن أن جسيمًا يتحرك بسرعة مقدارها $w^x = c$ في S. ستكون سرعته في S' مقدارها

$$w^{x'} = \frac{c - v}{1 - v/c} = c .$$

إذًا الجسيم المتحرك بسرعة الضوء c في إطار إسناد قصوري واحد سوف يتحرك بسرعة c بالنسبة لجميع أُطر الإسناد.

٤,٨ المقياس المتري للزمكان

اعتبر حدثين في الزمكان. يمكن ربطهما بمتجه إزاحة رباعي Δx تكون مركباته

$$\Delta x^{\alpha} = \{\Delta x^0 . \Delta x^1 . \Delta x^2 . \Delta x^3\} . \qquad (4.31)$$

بما أن مقدار متجه الإزاحة الرباعي هو المسافة الزمكانية بين الحدثين، ينتج أن حاصل الضرب القياسي لمتجه الإزاحة الرباعي مع نفسه يكون مساويًا لمربع المسافة الزمكانية Δs بين الحدثين:

$$\Delta s^2 = \Delta \mathbf{x} \cdot \Delta \mathbf{x} . \qquad (4.32)$$

إذا قارنا (٤,٣٢) بالفترة الزمكانية

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 . \qquad (4.33)$$

نرى أن الطرف الأيمن من (٤,٣٣) لا يشبه معادلة حاصل ضرب قياسي، فيما عدا أن الإشارات ليست كلها متماثلة. نعلم أن سبب هذا التضارب هو الهندسة الإقليدية الزائفة للزمكان. لذا دعنا نستفيد من هذا التماثل ونكتب الفترة الزمكانية بصورة أكثر اكتنازًا عن طريق استخدام اصطلاح الجمع المعتاد بأنه دائمًا ما يكون هناك جمع على قرائن علوية وسفلية متكررة:

$$\Delta s^2 = \eta_{\alpha\beta}\Delta x^\alpha \Delta x^\beta \ . \qquad (4.34)$$

حيث

$$\eta_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \qquad (4.35)$$

تسمى بالممتدَّة المترية أو للتبسيط بالمترية لزمكان مينكوفسكي الإقليدي الزائف. (كما هي العادة، جميع الحروف الإغريقية تعبر عن الأرقام من 0 إلى ٣.) من المؤكد أنه بأخذ (٤,٣٥) في الاعتبار، تتطابق المعادلة المكتنزة للفترة الزمكانية (٤,٣٤) مع صورتها الصريحة (٤,٣٣). سوف تسمح لنا المترية بحساب حواصل الضرب القياسي للمتجهات الرباعية.

٤,٩ عن الزمن الإحداثي والحقيقي

الجسيمات المألوفة، التي تكون سرعاتها أصغر من c، تتبع خطوطًا كونية أشباه زمنية في الزمكان. كما رأينا أعلاه يكون طول الخط الكوني شبه الزمني متناسبًا مع الزمن الحقيقي τ للجسيم المناظر. لهذا يمكن اعتبار خط كوني لساعة ما وكأنه مسطرة زمنية في الزمكان. ولأننا نستطيع استخدام الزمن الحقيقي لمعايرة خط كوني شبه زمني، يمكننا التعبير عن جميع الإحداثيات الأربعة x^α لجسيم كدالة فى τ:

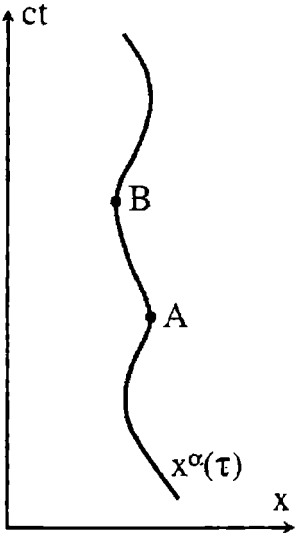
$$x^\alpha = x^\alpha(\tau)$$

أو

$$x^\alpha = \left\{x^0(\tau).x^1(\tau).x^2(\tau).x^3(\tau)\right\} \qquad (4.36)$$
$$= \left\{ct(\tau).x(\tau).y(\tau).z(\tau)\right\}.$$

اعتبر حدثين A وB واقعين على خط كوني لجسيم، كما هو مبين في شكل ٤,٢٦. في إطار الإسناد القصوري S الذي يكون فيه الجسيم ساكنًا، يكون الطول الزمكاني للخط الكوني بين هذين الحدثين هو الزمن الحقيقي مضروبًا في c:

$$\Delta s_{AB}^2 = c^2 \Delta \tau_{AB}^2 .$$



شكل ٤,٢٦ الطول الحقيقي لخط كوني شبه زمني

لأن الزمن الحقيقي τ متناسب مع المسافة الزمكانية، التي تكون لامتغيرة، فمن الواضح أن الزمن الحقيقي نفسه يكون لامتغيرًا. وهذا ليس بمفاجأة لأنه لا ينبغي على طول الخط الكوني (مثل الطول في الفضاء العادي ثلاثي الأبعاد) أن يعتمد على الطريقة التي يقاس بها.

في إطار آخر S' في حالة حركة نسبية بالنسبة إلى S، يكون نفس الطول الزمكاني هو

$$\Delta s'^2_{AB} = c^2 \Delta t'^2_{AB} - \Delta x'^2_{AB} - \Delta y'^2_{AB} - \Delta z'^2_{AB} .$$

ولأن الطول الزمكاني لامتغير، يكون لدينا $\Delta s^2_{AB} = \Delta s'^2_{AB}$ وبالتالي يكون،

$$\Delta \tau_{AB} = \Delta t_{AB} \left(1 - \beta^2\right)^{1/2} . \qquad (4.37)$$

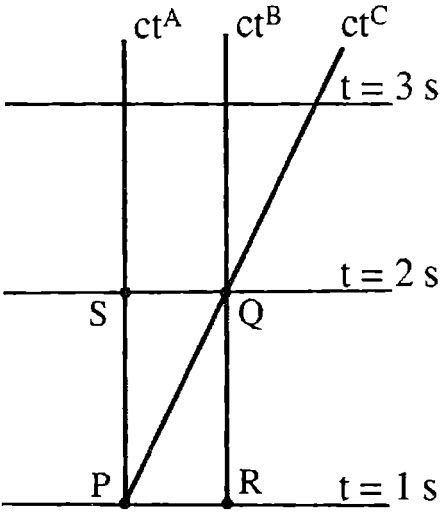
حيث

$$\beta^2 = \frac{\Delta x'^2_{AB} + \Delta y'^2_{AB} + \Delta z'^2_{AB}}{c^2 \Delta t^2_{AB}} = \frac{v^2}{c^2} .$$

لقد استنتجنا (٤,٣٧) مرة أخرى للتأكيد على أوجه التماثل والاختلاف بين الزمن الحقيقي τ والزمن الإحداثي t. في (٤,٣٧)، يكون الزمن الحقيقي $\Delta \tau_{AB}$ متناسبًا مع الطول الحقيقي $\Delta s_{AB} = c\Delta \tau_{AB}$ للخط الكوني بين الحدثين A وB. إذاً الزمن $\Delta \tau_{AB}$ هو فترة زمنية (بين الحدثين A وB وذلك كما قيس في S)، غير أنها فترة لامتغيرة. من ناحية أخرى، $\Delta \tau_{AB}$ هو أيضًا فترة زمنية بين نفس الحدثين ولكن كما قيسا في الإطار 'S الذي يتحرك الجسيم بالنسبة له. ولأن $\Delta \tau_{AB}$ هو إسقاط للطول شبه الزمني AB فوق محور 'S الزمني، فهو ليس فترة زمنية لامتغيرة. السبب هو أنه، في أطر الإسناد المختلفة التي تكون محاورها الزمنية غير متوازية، ينتج من الإسقاط فترات زمن إحداثي مختلفة Δt لنفس المسافة الزمكانية AB، أيْ لنفس الزمن الحقيقي τ.

إذا وضعنا $v = 0$ في (٤,٣٧)، مما يعني أن (٤,٣٧) تكون مكتوبة في S، نرى أنه، في إطار إسناد قصوري، يتطابق الزمنان الحقيقي والإحداثي: $\Delta \tau_{AB} = \Delta t_{AB}$.

الفرق بين الزمنين الحقيقي والإحداثي يمكن توضيحه أكثر عن طريق اعتبار ثلاث ساعات A، B، وC، الخطوط الكونية الخاصة بها مبينة في شكل ٤,٢٧. الساعتان A وB ثابتتان بالنسبة لبعضهما، بينما تتحرك C بانتظام بالنسبة لهما. تقيس كل ساعة زمنها الحقيقي على طول خطها الكوني. إذًا، يقاس الزمن الحقيقي بواسطة ساعة فردية لأن طول الخط الكوني شبه الزمني يكون متناسبًا مع الزمن الحقيقي. وبما أن A وB ثابتان بالنسبة لبعضهما، فإنهما يشتركان في نفس إطار الإسناد القصوري. لذلك يكون لديهما تزامن مشترك، مما يعني أنهما متواقتتان ويُظهران نفس القراءة بالتزامن. خطوط التزامن المناظرة لثلاث لحظات من الزمن مُوضحة بالرسم في شكل ٤,٢٧. تحدد هذه الخطوط زمنًا إحداثيًا في إطار إسناد A وB القصوري – يمكننا اعتبار خطوط التزامن وكأنها تناظر كل ثانية من الزمن الإحداثي (العالمي) في الإطار القصوري.



شكل ٤,٢٧ الأزمنة الحقيقية للساعات A، B، وC تقاس على طول خطوطها الكونية. خطوط التزامن الأفقية تحدد الزمن الإحداثي في إطار A وB القصوري.

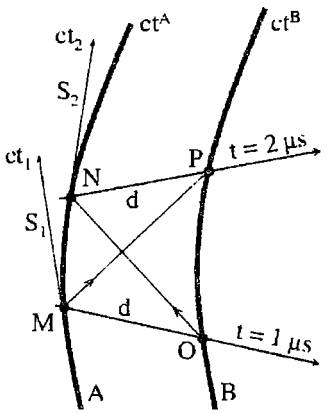
تخيل الآن أن الساعة C تقيس تجربة ما تبدأ عند الحدث P وتنتهي عند الحدث Q. عندئذ يكون الزمن الحقيقي بين P و Q هو τ_{PQ}^{C}، ويكون مقاسًا بواسطة ساعة واحدة فقط (الساعة C). كما هو مبين في شكل ٤,٢٧، يقاس الزمن المتمدد نسبويًا t_{PQ} بواسطة ساعتين – بداية التجربة P تقاس بواسطة ساعة A، بينما تقاس نهاية التجربة بواسطة ساعة B. بما أن أي قياس بواسطة ساعات *متباعدة* ينطوي على زمن إحداثي (لأن الساعات المتباعدة يجب أن تكون متواقتة)، فإنه يُعَبَّر أيضًا عن الزمن المتمدد نسبويًا t_{PQ} بدلالة الزمن الإحداثي لإطار الإسناد القصوري الذي يكون فيه A و B في حالة سكون. بالنسبة إلى A و B، تستغرق التجربة المقاسة بواسطة C زمنًا قدره $1s$ من زمن A و B الإحداثي. ولكن زمن التجربة الحقيقي المقاس بواسطة C يكون أقصر (يبدو أطول في شكل ٤,٢٧ لأننا نمثل تأثير الزمكان الإقليدي الزائف لتمدد الزمن على السطح الإقليدي للورقة).

لمعرفة الأدوار المختلفة للزمنين الإحداثي والحقيقي، لاحظ أن لدينا $t_{PQ} = t_{PS} = t_{RQ}$. من ناحية، يكون الحدثان P و R متزامنين – يقعان على خط التزامن $t = 1s$. ومن ناحية أخرى، يكون الحدثان Q و S متزامنين – يقعان على خط التزامن $t = 2s$. لذلك، يكون الزمن الإحداثي بين أي حدث يقع على الخط $t = 1s$ وأي حدث على الخط $t = 2s$ هو $1s$. ربما تكون أفضل طريقة للتفريق بين الزمن الإحداثي والحقيقي هي الانتباه إلى أن الزمن الإحداثي يُعَبَّر عنه بدلالة خطوط تزامن (يمثل الفضاءين اللحظيين، اللذين يناظران لحظتين ما في زمن إطار إسناد)، بينما الزمن الحقيقي يتناسب فحسب مع طول خط كوني شبه زمني بين حدثين يقعان على نفس الخط الكوني. واضح من شكل ٤,٢٧ أن الزمنين الإحداثي والحقيقي يتطابقان في إطار إسناد قصوري، والزمنين الحقيقيين τ_{PS}^{A} و τ_{RQ}^{B} المقاسين على طول خطي A و B الكونيين يكونان مساويين للزمن الحقيقي $t_{PS} = t_{RQ}$. ولكن ليس هذا هو الحال في إطار إسناد لاقصوري (متسارع أو معلق في مجال تقالي).

تناظر خطوط التزامن في إطار إسناد قصوري الأفضية اللحظية ثلاثية الأبعاد المنتمية للحظات مختلفة من الزمن في إطار الإسناد. تكون هذه الأفضية متوازية، كما هو مبين في شكل ٤,٢٧. ومع ذلك، لا تكون الأفضية التي تناظر لحظات مختلفة من زمن إطار إسناد لاقصوري متوازية، وذلك كما رأينا في شكل ٤,٣، وكما هو مبين في شكل ٤,٢٨. هذا يعني أن الزمنين الإحداثي والحقيقي لا يتطابقان في إطار إسناد لاقصوري. في شكل ٤,٢٨، يناظر زمن إحداثي $\Delta t = 1\mu s$ زمنين حقيقيين مختلفين لمراقبين A وB ساكنين في الإطار اللاقصوري – الزمن الحقيقي بالنسبة إلى A هو τ^{A}_{MN}، بينما بالنسبة إلى B يكون $\tau^{B}_{OP} \neq \tau^{A}_{MN}$.

لكي نفهم هذا على نحو أفضل، دعنا نناقش بتفصيل أكثر ما هو موضح بالرسم في شكل ٤,٢٨. مراقبان A وB ساكنان في إطار إسناد متسارع S_a. تكون المسافة d التي تفصل بينهما على طول خط التسارع a عند كل لحظة من زمنهما الإحداثي – عند $t = 1\mu s$، ويكون a على طول الخط الواصل بين الحدثين M وO، مشيرًا إلى الاتجاه من M إلى O؛ عند $t = 2\mu s$، ويكون على طول الخط NP. عند الحدث M، يتطابق الفضاء اللحظي (الممثل بخط التزامن $t = 1\mu s$) لإطار الإسناد المتسارع مع فضاء إطار الإسناد القصوري S_1، والذي يكون ملازمًا للحركة لحظيًا مع S_a عند الحدث M. ومن ثم يتشارك عند M الإطار المتسارع S_a مع الإطار الملازم لحظيًا لحركته S_1 في نفس الفضاء والاتجاه الزمني. عند الحدث N، يتقاسم S_a مع إطار آخر S_2 ملازم لحظيًا لحركته في نفس الفضاء والاتجاه الزمني. لقد زادت سرعة الإطار المتسارع بالنسبة إلى S_1 من الحدث M، عندما كان ساكنًا لحظيًا بالنسبة إلى S_1، وإلى الحدث N، عندما يكون ساكنًا لحظيًا بالنسبة إلى S_2. هذا يعني أن S_1 وS_2 في حالة حركة نسبية وفضاءيهما (واتجاهيهما الزمنيين) غير متوازيين. يوضح هذا لماذا لا يكون الفضاءان اللحظيان للإطار المتسارع عند M وN متوازيين.

هذه الحقيقة يمكن إقرارها تجريبيًا. يمكن لمراقبين في إطار إسناد متسارع S_a أن يستخدما إشارات ضوئية لتعريف الأفضية اللحظية المناظرة للحظات مختلفة من زمن S_a الإحداثي. افترض أن المراقبَين A وB الساكنين في S_a يرسلان إشارات ضوئية بالتزامن في اتجاه بعضهما بعضا عند $t=1\mu s$. كما هو مبين في شكل ٤,٢٨، يعرف الانبعاث المتزامن للإشارتين الضوئيتين عند الحدثين M وO الفضاء اللحظي للإطار المتسارع، الممثل بخط التزامن $t=1\mu s$، الذي يقع فيه هذان الحدثان. الوصول المتزامن للإشارتين عند الحدثين N وP يعرِّف الفضاء اللحظي للإطار المتسارع، الممثَّل بخط التزامن $t=2\mu s$، الذي يناظر الحدثين N وP. يمكن بسهولة تبين أن فضاء S_a اللحظي، الممثَّل بخط التزامن $t=2\mu s$، يتطابق مع الفضاء اللحظي لإطار الإسناد القصوري S_2 الملازم للحركة عند N.



شكل ٤,٢٨ يقاس الزمنان الحقيقيان لملاحظَين متسارعين A وB على طول خطيهما الكونيين. يُعَرَّف خطا التزامن الأفقيان تقريبًا زمنًا إحداثيًا في إطار A وB اللاقصوري.

في S_1، الذي يكون عنده انبعاث الإشارتين الضوئيتين متزامناً أيضًا، يكون الزمن الإحداثي الذي تستغرقه الإشارة الضوئية المنبعثة بواسطة المراقب A لكي تنتقل إلى B (من الحدث M إلى الحدث P) هو

$$\Delta t_A = \frac{d + \frac{1}{2}a\Delta t_A^2}{c} .$$

ويكون الزمن الإحداثي الذي تستغرقه الإشارة الضوئية المنبعثة بواسطة B لكي تنتقل إلى A (من الحدث O إلى الحدث N) هو

$$\Delta t_B = \frac{d - \frac{1}{2}a\Delta t_B^2}{c} .$$

حلول معادلتي الدرجة الثانية في Δt_A و Δt_B، وهما تحديدًا:

$$\frac{1}{2}a\Delta t_A^2 - c\Delta t_A + d = 0$$

و

$$\frac{1}{2}a\Delta t_B^2 + c\Delta t_B - d = 0 .$$

يمكن الحصول عليها فى نطاق حدود متناسبة مع c^{-3} عن طريق استخدام مفكوك المتسلسلة

$$(1 \pm x)^{1/2} = 1 \pm \frac{1}{2}x - \frac{1}{2}\frac{1}{4}x^2 + \cdots ,$$

مع النتيجة

$$\Delta t_A \approx \frac{d}{c} + \frac{ad^2}{2c^3} \qquad (4.38)$$

و

$$\Delta t_B \approx \frac{d}{c} - \frac{ad^2}{2c^3} . \qquad (4.39)$$

وبما أن $\Delta t_A \neq \Delta t_B$، فإن الإشارتين الضوئيتين لا تصلان إلى N و P بالتزامن في S_1. الفرق الزمني بين وصول الإشارتين الضوئيتين في S_1 هو

$$\delta t = \Delta t_A - \Delta t_B = \frac{ad^2}{c^3} .$$

على الرغم من ذلك، ينبغي أن تصل الإشارتان بالتزامن في S_a وينبغي أن تحدد خط التزامن $t = 2\mu s$، والذي يمثل فضاء S_a اللحظي الذي يحتوي على الحدثين P و N. كما سنرى في القسم ٧,٣، السرعة الإحداثية المتوسطة للضوء بين المراقبَين A و B تكون كما هي في كلا الاتجاهين، مما يفسر لماذا يمكن تعريف خط التزامن $t = 2\mu s$ كما هو موضح في شكل ٤,٢٨. السؤال الآن هو هل وصول الإشارتين عند N و P سيكون أيضًا متزامنًا في S_2، مما يعني أن فضائَيْ S_a و S_2 اللحظيين يتطابقان.

تحويل لورنتز للفترة الزمنية δt في S_1 و S_2 هو

$$\delta t_2 = \frac{\delta t_1 - \frac{\beta}{c}\Delta x_1}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.40)$$

يمكن استخدام طريقتين لإثبات أن الإشارتين الضوئيتين تصلان بالتزامن في S_2. الأولى هي أن ندخل $\delta t_1 = ad^2/c^3$ في (٤,٤٠) ونبين أن $\delta t_2 = 0$. الثانية هي أن نضع $\delta t_2 = 0$ في (٤,٤٠) ونبين أن $\delta t_1 = ad^2/c^3$. الطريقة الثانية أسرع قليلاً، وسوف نستخدمها هنا. بما أن الطرف الأيسر في (٤,٤٠) يساوي صفرًا، فيجب أن يكون البسط للطرف الأيمن صفرًا أيضًا:

$$0 = \delta t_1 - \frac{\beta}{c}\Delta x_1 \,. \tag{4.41}$$

لحساب δt_1، يجب أن نعيِّن معادلتي $\beta = v/c$ و Δx_1 في S_1. مقدار سرعة S_2 بالنسبة إلى S_1 هو $v = a\overline{\Delta t_1}$، حيث $\overline{\Delta t_1}$ هو متوسط الزمن في S_1 لرحلة الإشارتين الضوئيتين من A إلى B والعكس. باستخدام (٤,٣٨) و(٤,٣٩)،

$$\overline{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_A + \Delta t_B}{2} = \frac{d}{2c} + \frac{ad^2}{4c^3} + \frac{d}{2c} - \frac{ad^2}{4c^3} = \frac{d}{c} \,.$$

وبذلك يكون

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{a\overline{\Delta t_1}}{c} = \frac{ad}{c^2} \,.$$

متوسط المسافة في S_1 لرحلة الإشارتين الضوئيتين من A إلى B والعكس هي

$$\Delta x_1 = \frac{1}{2}\left(d + \frac{1}{2}a\overline{\Delta t_1}^2 + d - \frac{1}{2}a\overline{\Delta t_1}^2\right) = \frac{1}{2}\left(d + \frac{ad^2}{2c^2} + d - \frac{ad^2}{2c^2}\right) = d \,.$$

إذاً من (٤,٤١) ينتج،

$$\delta t_1 = \frac{\beta}{c}\Delta x_1 = \frac{ad}{c^2}d = \frac{ad^2}{c^3} \,.$$

لقد أوضحنا أنه عندما تصل الإشارتان المنبعثتان عند الحدثين M وO بالتزامن في S_2 عند P وN، على التوالي، لا يكون الحدثان P وN متزامنين في S_1، ويكون الزمن بينهما هو $\delta t_1 = ad^2 / c^3$، وذلك نتيجة حسابه بطريقة مستقلة في S_1. هذا يوضح أنه، عندما تصل الإشارتان الضوئيتان عند N وP بالتزامن في S_a، يكون الحدثان N وP متزامنين أيضًا في S_2. لذلك يكون S_a و S_2 لهما خط تزامن مشترك، أيْ يشترك إطارا الإسناد في نفس الفضاء. بمعنى آخر، S_2 هو إطار الإسناد المتحرك بالتلازم لحظيًا لحركة S_a عند الحدث N.

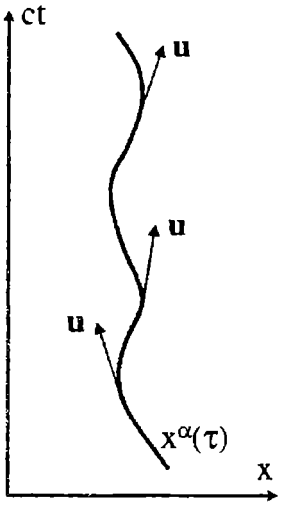
إجمالاً، يُعرَّف الزمن الإحداثي بين حدثين بدلالة الفضاءين اللحظيين اللذين يقع فيهما الحدثان. في شكل ٤,٢٨، الزمن الإحداثي بين الحدثين M وN، أو بين O وP، هو $1\mu s$، لأن M وO يقعان في فضاء S_a اللحظي، الممثل بخط التزامن $t = 1\mu s$، بينما يقع N وP في فضاء S_a اللحظي، الممثل بخط التزامن $t = 2\mu s$.

يُعرَّف الزمن الحقيقي بأنه الزمن بين حدثين يحدثان مع نفس الجسم، والذي يقاس بواسطة مراقب ساكن بالنسبة إلى الجسم. لذلك يكون الزمن الحقيقي بين حدثين، يقعان على الخط الكوني شبه الزمني للجسم الذي يحدث معه الحدثان، متناسبًا مع طول الخط الكوني بين الحدثين. في شكل ٤,٢٨، يكون الزمن الحقيقي بين الحدثين M وN، الواقعين على الخط الكوني للمراقب A، هو $\Delta\tau_A^{MN} = \Delta s^{MN} / c$، حيث Δs^{MN} هو طول خط A الكوني بين الحدثين M وN. بنفس الطريقة، يكون الزمن الحقيقي بين الحدثين O وP، الواقعين على الخط الكوني للمراقب B، هو $\Delta\tau_B^{OP} = \Delta s^{OP} / c$.

الـــزمن الإحـــداثي بـــين الحـــدثين M وN وبـــين O وP كمـــا هـــو: $\Delta t^{MN} = \Delta t^{OP} = 1\mu s$، بينما يكون الزمنان الحقيقيـــان $\Delta\tau_A^{MN} \neq \Delta\tau_B^{OP} \neq 1\mu s$. من الواضح أن الزمنين الإحداثي والحقيقي لا يتطابقان في S_a، لأن خطـــي التزامن، اللذين يعرفان لحظتين من زمن إحدائي، ليـــسا متـــوازيين؛ تكـــون خطوط التزامن في إطار إسناد قصوري ما دائمًا متوازية، مما يفـــسر لمـــاذا يتطابق الزمنان الإحداثي والحقيقي في تلك الأطر.

٤,١٠ السرعة الرباعية، وكمية التحرك الرباعية، والكتلة النسبوية

عندما تُمَثَّل حركة جسيم في فضاء عـــادي ثلاثـــي الأبعـــاد بواســـطة مساره، يكون المتجه المماسي عند نقطة معينة هو سرعة الجسيم عنـــد تلـــك النقطة. لدينا موقف مماثل في الزمكان. كما في شكل ٤,٢٩، يمكن النظر إلى المتجهات الرباعية **u** التي تكون مماسية للخط الكوني شبه الزمني لجسيم مـــا على أنها سرعته الرباعية، المناظرة لأحداث مختلفة من الخط الكوني.



شكل ٤,٢٩ السرعة الرباعية لجسيم تكون مماسية لخطه الكوني

المركبات u^α للسرعة الرباعية **u** هي مشتقات المركبات الرباعية x^α للجسيم بالنسبة إلى زمنه الحقيقي:

$$u^\alpha = \frac{\mathrm{d}x^\alpha}{\mathrm{d}\tau} . \qquad (4.42)$$

معادلات المركبات u^α الصريحة للسرعة الرباعية هي

$$u^0 \equiv u^t = \frac{\mathrm{d}x^0}{\mathrm{d}\tau} = \frac{c\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau} = \frac{c}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.43)$$

حيث

$$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau} = \frac{1}{(1-\beta^2)^{1/2}}$$

هي العلاقة بين الزمن الإحداثي والحقيقي كما يتضح من (٤,٣٧). تكون المركبة السينية للسرعة الرباعية هي

$$u^1 \equiv u^x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau} = \frac{v^x}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.44)$$

حيث $dx/dt = v^x$ هي المركبة السينية لسرعة الجسيم العادية (النسبية) بالنسبة إلى إطار الإسناد القصوري الذي قيست فيه. المركبتان $u^{x'}$ و u^x لهما نفس الصورة مثل u^x.

كما يتضح من (٤,٤٣)، لا يمكن لمركبة زمن السرعة الرباعية أن يكون صفرًا في أي إطار إسناد، بينما تصبح مركبات **u** المكانية (٤,٤٤) صفرًا عندما تكون سرعة الجسيم العادية صفرًا. وبما أن متجه السرعة

الرباعية $\mathbf{u}$ يكون مماسيًا للخط الكوني للجسيم، فإن $\mathbf{u}$ لها نفس مركبة زمن في إطار الإسناد الذي يكون فيه الجسيم ساكنًا، أيْ في إطار السكون الخاص به، لأن متجه السرعة الرباعية يقع على طول محور الزمن للإطار.

باستخدام المفهوم:

$$\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2} = \left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = \left[1-\frac{(v^x)^2+(v^y)^2+(v^z)^2}{c^2}\right]^{-1/2}$$

يمكننا كتابة المركبات للسرعة الرباعية على الصورة

$$u^\alpha = \left\{u^0, u^1, u^2, u^3\right\} = \left\{\gamma c, \gamma v^x, \gamma v^y, \gamma v^z\right\}. \qquad (4.45)$$

أو

$$u^\alpha = \left\{\gamma c, \gamma \mathbf{v}\right\};$$

حيث $\mathbf{v} = \left\{v^x, v^y, v^z\right\}$. باستخدام الضرب القياسي لمتجه السرعة الرباعية في نفسه، نحصل على النتيجة الهامة

$$\mathbf{u}\cdot\mathbf{u} = \eta_{\alpha\beta}u^\alpha u^\beta = (u^0)^2 - (u^1)^2 - (u^2)^2 - (u^3)^2 = c^2. \qquad (4.46)$$

إذا تمت معايرة السرعة الرباعية عن طريق اختيار $c=1$ في (٤,٤٦)، عندئذ يتضح أن $\mathbf{u}$ هي متجه وحدة رباعي شبه زمني.

يسمح لنا متجه السرعة الرباعية أن نعرف كمية التحرك الرباعية لجسيم كتلة سكونه m تقاس في إطار السكون الخاص به:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{u}. \qquad (4.47)$$

بأخذ (٤,٤٦) في الاعتبار، يمكننا الحصول على حاصل الضرب القياسي لكمية التحرك الرباعية في نفسها بكتابة:

$$\mathbf{p}^2 = \mathbf{p}\cdot\mathbf{p} = m^2\mathbf{u}\cdot\mathbf{u} = m^2c^2 \,. \tag{4.48}$$

ويمكننا بسهولة كتابة المركبات p^α لكمية التحرك الرباعية، وذلك بما أننا نعلم مركبات السرعة الرباعية (٤,٤٥):

$$p^0 = \frac{mc}{(1-\beta^2)^{1/2}} \,, \tag{4.49}$$

و

$$p = \frac{mv}{(1-\beta^2)^{1/2}} \,. \tag{4.50}$$

وبذلك يكون

$$p^\alpha = \left\{\gamma mc, \gamma mv\right\} \,. \tag{4.51}$$

المركبات المكانية لكمية التحرك الرباعية هي كمية التحرك المعتادة (الكلاسيكية) mv مع التصحيح النسبوي γ. كما يتضح من (٤,٥٠)، في حالة سرعات صغيرة $v/c \ll 1$، تختزل بالفعل إلى كمية التحرك الكلاسيكية:

$$p = mv + \cdots \,.$$

المعنى الفيزيائي لمركبة الزمن لكمية التحرك الرباعية ليس واضحًا بصورة مباشرة. دعنا نرى هل نستطيع اكتساب بعض التبصر من معادلة p^0 (٤,٤٩) لسرعات صغيرة:

$$\begin{aligned} p^0 &= mc\left(1 + \frac{1}{2}m\frac{v^2}{c^2} + \cdots\right) = mc + \frac{1}{2}m\frac{v^2}{c} + \cdots \\ &= \frac{1}{c}\left(mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \cdots\right) \,. \end{aligned} \tag{4.52}$$

الحد الثاني بين القوسين في (٤,٥٢) هو طاقة الحركة العادية، ولكن الحد الأول هو طاقة نسبوية جديدة. دعنا نسميها بطاقة السكون لجسيم، وذلك لأنها هي وحدها التي تظل في إطار السكون للجسيم، أيْ عندما تكون السرعة في (٤,٥٢) صفرًا. إذا رمزنا إلى طاقة الجسيم الكلية لسرعات صغيرة بالرمز

$$E = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \cdots ,$$

فإن معادلة p^0 تصبح

$$p^0 = \frac{E}{c} .$$

والآن بما أن p^0 لا يمكن أن يُعبَّر عنها بمعادلتين مختلفتين للسرعات الصغيرة والكبيرة، فإن معادلتها العامة كما هي، ولكن من الواضح أن تكون الطاقة في هذه الحالة

$$E = \frac{mc^2}{(1-\beta^2)^{1/2}} . \qquad (4.53)$$

هذه هي الطاقة النسبوية الكلية لجسيم يتحرك بأي سرعة $v < c$. في إطار السكون الخاص بجسيم، تختزل طاقته إلى طاقة سكونه:

$$E = mc^2 .$$

بدلالة الطاقة النسبوية الكلية تكون مركبات كمية التحرك الرباعية هي

$$p^\alpha = \left\{E/c, p\right\} = \left\{\gamma mc, \gamma mv\right\} . \qquad (4.54)$$

يصبح المعنى الفيزيائي لمركبة الزمن لكمية التحرك الرباعية واضحًا الآن – فهو متناسب مع طاقة الجسيم. بذلك، اتضح أن خاصيتين ديناميكيتين مختلفتين، على ما يبدو، لجسيم، وهما طاقته وكمية حركته، هما مركبتان مختلفتان لنفس المتجه الرباعي في الزمكان. لهذا تسمى كمية التحرك الرباعية أيضًا بمتجه الطاقة وكمية التحرك.

باستخدام (٤,٤٨) و(٤,٥٤)، يمكننا إيجاد العلاقة النسبوية بين E و p بواسطة حساب حاصل الضرب القياسي لكمية التحرك الرباعية في نفسها:

$$\mathbf{p}\cdot\mathbf{p} = \eta_{\alpha\beta}p^{\alpha}p^{\beta} = (p^0)^2 - p^2 = m^2c^2 .$$

وبما أن $p^0 = E/c$ ، يكون لدينا

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2 . \qquad (4.55)$$

دعنا الآن نطرح المسألة المسماة بالتزايد النسبوي للكتلة، والتي أصبحت مثيرة للجدل في الآونة الأخيرة. يمكننا كتابة (٤,٥٠) و(٤,٥٣) على الصورة.

$$p = \frac{mv}{(1-\beta^2)^{1/2}} = m(v)v .$$

$$E = \frac{mc^2}{(1-\beta^2)^{1/2}} = m(v)c^2 ,$$

حيث

$$m(v) = \frac{m}{(1-\beta^2)^{1/2}} = \frac{m}{(1-v^2/c^2)^{1/2}} \qquad (4.56)$$

هي الكتلة النسبوية للجسيم، والتي تكون دالة في سرعة الجسيم.

لقد كان هناك احتجاجات حديثة ضد استخدام مفهوم الكتلة النسبوية. سار هذا الجدال على النحو التالي [٢٥، من ص ٢٥٠ إلى ٢٥١]:

يخضع مفهوم "الكتلة النسبوية" لسوء الفهم [...]. أولاً، أنه يستعمل اسم الكتلة – المنتمية إلى مقدار متجه رباعي – لمفهوم مختلف تمامًا، مركبة الزمن لمتجه رباعي. ثانيًا، أنه يجعل تزايد طاقة جسيم بزيادة سرعته أو كمية حركته يبدو كأنه متصل ببعض التغير في البناء الداخلي للجسيم. في الواقع، تزايد الطاقة مع السرعة لا ينشأ في الجسم وإنما في الخواص الهندسية للزمكان نفسه.

صحيح أن مقدار كمية التحرك الرباعية يتناسب مع كتلة السكون لجسيم وذلك كما يتضح من (٤,٤٨):

$$|\mathbf{p}| = mc\ .$$

مركبة الزمن لكمية التحرك الرباعية

$$p^0 = \frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} = m(v)c$$

تتناسب مع الكتلة النسبوية $m(v)$. لذا يظهر بالفعل أن كتلة السكون (الكتلة الحقيقية) m تتناسب مع مقدار متجه رباعي، بينما تكون الكتلة النسبوية $m(v)$ مركّبة من متجه رباعي. على الرغم من ذلك، يكون الوضع مماثلاً بدقة بالنسبة إلى الزمنين الحقيقي والإحداثي. كما يظهر من (٤,٣٢)، يكون مربع المسافة الزمكانية Δs^2 بين حدثين يقعان على خط كوني شبه زمني مساويًا لحاصل الضرب القياسي $\Delta x \Box \Delta x$ لمتجه الإزاحة الرباعي Δx الواصل بين الحدثين. بعبارة أخرى، يكون مقدار متجه الإزاحة مساويًا للمسافة الزمكانية:

$$|\Delta \mathbf{x}| = \Delta s \, .$$

بما أن $\Delta s = c\Delta\tau$، فإن مقدار Δx يتناسب مع الزمن الحقيقي $\Delta\tau$ بين الحدثين المتصلين بواسطة متجه الإزاحة:

$$|\Delta \mathbf{x}| = c\Delta\tau \, .$$

ولذلك، يكون مقدار المتجه الرباعي Δx متناسبًا مع الزمن الحقيقي $\Delta\tau$. لكن من ناحية أخرى، يكون الزمن الإحداثي هو المركبة الصفرية (مركبة الزمن) $\Delta x^0 = c\Delta t$ لمتجه الإزاحة الرباعي Δx في (٤,٣١).

وبالتالي، إذا كنا لا نستطيع الحديث عن الكتلة النسبوية، فبنفس الحجة ينبغي أن نتحدث فقط عن الزمن الحقيقي، الذي يكون لامتغيرًا، وننكر الاسم "زمن" على الزمن الإحداثي. الزمن الحقيقي لامتغير، ولكن يمكن للزمن أن يتغير نسبويًا أيضًا. نفس الشيء يحدث بالنسبة للكتلة أيضًا. بل إنه يصبح أكثر تأكيدًا من خلال تعريف الكتلة نفسه على أنه قياس للمقاومة التي يبديها جسيم لتسارعه أو، في إطار النسبية، على أنه قياس للمقاومة التي يبديها جسيم عندما ينحرف عن مساره الجيوديسي. تكون المقاومة مختلفة في أُطر إسناد مختلفة يتحرك الجسيم بالنسبة لها بسرعات مختلفة. لذلك ينبغي أن تختلف كتلة الجسيم أيضًا في أطر مختلفة. يجب التأكيد على أن المقاومة تنشأ في الجسيم؛ فهي لا تأتي من الخواص الهندسية للزمكان. إن الزمكان هو الذي يحدد شكل الخط الكوني الجيوديسي، ولكن الجسيم هو الذي يقاوم عندما يُمنع من اتباع مسار جيوديسي. لدينا إثبات بأن المقاومة لا تنشأ في هندسة الزمكان – فالجسيم الذي يتشوه خطه الكوني نتيجة لحيوده عن شكله الجيوديسي يبدي نفس المقاومة في زمكان مسطح ومنحنٍ كما يُظهره التساوي بين الكتلتين القصورية و الثقالية المُطاوعة (انظر الفصل التاسع لمزيد من التفاصيل).

٤,١١ ملخص

كانت الفكرة الأساسية لهذا الفصل هي استثمار أوجه التشابه بين الفضاء الإقليدي والزمكان. ولأن أعضاء فريق البحث الجذري أرادوا إيجاد وسيلة لاختبار فرضيتهم الرئيسية – بأن الزمكان واقعي – فقد وجدوا وسيلة بسيطة للغاية ولكنها فعّالة لاستنتاج تنبؤات من فرضية الزمكان. إذا كان الزمكان هو فضاء واقعي رباعي الأبعاد فإنه ينبغي أن يكون للعلاقات بين خطوط في الفضاء الإقليدي نظائر في الزمكان. وبالفعل، عندما "ترجم" فريق البحث الجذري العلاقات الإقليدية إلى العلاقات الزمكانية المناظرة لها، اتضح أن نتائج النسبية الخاصة هي، في واقع الأمر، مظاهر مؤيدة للبُعْدِيَّة الرباعية للزمكان.

قد يعترض البعض عند هذه النقطة على أن هذا لا يثبت شيئًا، فما فعله فريق البحث الجذري كان تمرينًا مثيرًا للاهتمام، ولكنه يظل مجرد تمرين لا يرغمنا على تغيير وجهات نظرنا نحو العالم. ما رأيناه في هذا الفصل هو أنه، لو أن الكون رباعي الأبعاد، لكانت هناك مظاهر لرباعية بعديته تطابق نتائج النسبية الخاصة. سوف يظهر في الفصل الخامس أن تلك النتائج ستصبح مستحيلة إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد.

الجزء الثاني

عن طبيعة الزمكان:
قضايا مفاهيمية وفلسفية

أهداف الجزء الثاني

لذلك يبدو من الطبيعي أكثر أن ننظر للواقع الفيزيائي على أنه وجود رباعي الأبعاد، بدلاً من أن يظل، كما هو حتى الآن، التطور لوجود ثلاثي الأبعاد.

ألبرت آينشتين [٢٧]

على الرغم من أن نظرية الكون رباعي الأبعاد قد تكون ناجحة، فإنه يصعب أن نتجاهل صوتًا بداخلنا يهمس: "أنت تعلم في أعماق ذاكرتك أن ما يسمى بعدًا رابعًا هراء تمامًا". أتخيل أن ذلك الصوت كان قد شغل معظم الوقتفي التاريخ الماضي للفيزياء. ما الهراء في أن نقول إن هذه المنضدة الجامدة التي أكتب فوقها هي تجمع من إلكترونات متحركة بسرعات هائلة في أفضية فارغة، وهي بالنسبة إلى الأبعاد الإلكترونية بالغة الاتساع مثلها مثل

الفراغات بين الكواكب في المجموعة الشمسية! ما الهراء في أن نقول إن الهواء الجوي الخفيف يحاول أن يسحق جسمي بثقل يبلغ ١٤ رطلاً لكل بوصة مربعة! ما الهراء في أن يكون الحشد النجمي الذي أراه بوضوح هناك الآن من خلال المنظار الفلكي، مجرد ومضة في أعماق الماضي منذ ٥٠٠٠٠ سنة! دعنا لا ننخدع بهذا الصوت. فهو غير موثوق به.

أ. س. إيدينجتون [٢٨، ص ٥٦]

يطرح هذا الجزء مجموعتين رئيسيتين من الأسئلة:

- ما إذا كانت نتائج النسبية الخاصة والتجارب التي تؤكدها ممكنة لو أن الكون ثلاثي الأبعاد،
- لماذا تُعتَبر تضمينات واقعية الزمكان بالغة الأهمية.

يحلل الفصل الخامس أربع نتائج كينماتيكية للنسبية الخاصة – نسبية التزامن، تقلّص الطول، تمدد الزمن، ومفارقة التوأم – عن طريق الأخذ في الاعتبار صراحةً وجود وبُعْدِيّة الأجسام الفيزيائية التي تشملها هذه التأثيرات النسبوية. هناك جدال حول أي من هذه التأثيرات لن يكون ممكنًا لو كان الكون ثلاثي الأبعاد. يحلل الفصل حجة أخرى أيضًا حول واقعية الزمكان المُستَنتج من النسبية العامة، ولكنه مشروح لحالة مراقب متسارع في النسبية الخاصة.

يناقش الفصل السادس تضمينات قضية طبيعة الزمكان لعدد من القضايا الأساسية الأخرى مثل اصطلاحية التزامن، التغير، الصيرورة الزمانية، انسياب الزمن، والإرادة الحرة، وهي قضايا تبدو مختلفة تمامًا في كونين ثلاثي الأبعاد ورباعي الأبعاد.

يوضح هذا أن تلك القضايا يتقدم عليها سؤال خاص بطبيعة الزمكـــان، وبالتالي يجب أن يسبق حلّها أيضًا حلٌ سؤال واقعية الزمكان.

يستعرض الفصل السادس أيضًا بعض الأوراق البحثية الحديثـــة عـــن وجهة نظر الكون الكتْلي المتنامي التي تم إحياؤها مـــؤخرًا بواســـطة عـــدة فيزيائيين. وبما أن الآنيّة (ثلاثية البعد) تناقضٌ لا يمكن إنكاره مـــع الـــدلائل التجريبية النسبوية، فإن النموذج الكوني للكون الكتْلي المتنامي يبدو أنه البديل المتبقي لكون مينكوفسكي المطلق رباعي الأبعاد.

الفصل الخامس

النسبية وبُعديّة الكون: الزمكان واقعيّ

في مخطط محدد تمامًا يُنظر إلى الماضي والمستقبل على أنهما قابعان في خريطة وضعت لهما – يتاح الكثير لاستكشاف الحاضر بقدر الأجزاء البعيدة في الفضاء. الأحداث لا تقع؛ إنها ببساطة تكون هناك، ونحن نمر عليها.

أ. س. إدينجتون [٢٨، ص 51]

كنا نتتبع في الفصلين السابقين فريق البحث الجذري في تحليلهم لمبدأ النسبية لجاليليو. استخدم أعضاؤه إجراءات محسَّنة من طريقة جاليليو للاستفسار العلمي وتمكنوا من ألاّ يشغلوا بالهم بالطبيعة غير الحدسية لاستنتاجاتهم. نعلم الآن أن التنبؤات المستنتجة بواسطة فريق البحث الجذري لاختبار واقعية الزمكان تطابق تنبؤات النسبية الخاصة. أكدت التجربة جميع نتائج النسبية الخاصة، ولكن قلة من الفيزيائيين والفلاسفة هم من نظروا إلى ذلك التأكيد على أنه دليل على وجود الزمكان. هناك سببان رئيسيان لهذا الوضع:

- حقيقة أن آينشتين صاغ نظرية النسبية الخاصة في عام ١٩٠٥ بدلالة لغتنا العادية ثلاثية الأبعاد،

- صياغة مينكوفيسكي رباعية الأبعاد للنسبية الخاصة عام ١٩٠٨، التي وحَّد فيها الفضاء والزمن إلى ما نسميه الآن زمكان مينكوفيسكي، كان يُنظر إليها بواسطة معظم الفيزيائيين والفلاسفة على أنها مجرد أداة رياضياتية بدون نظير موضوعي.

سوف نفحص في هذا الفصل نتائج النسبية الخاصة لنرى ما إذا كانت هي نفسها تسمح بتفسيرات مختلفة لطبيعة الزمكان.(*) سوف نحلل أربعة تأثيرات نسبوية كينماتية – نسبية التزامن، تقلّص الطول، تمدد الزمن، ومفارقة التوأم – عن طريق طرح سؤال بسيط: هل هذه التأثيرات تكون ممكنة إذا لم يكن زمكان مينكوفيسكي واقعيًا؟ من الواضح أن هذا السؤال مكافئ للسؤال: هل تكون تلك التأثيرات ممكنة لو أن الكون ثلاثي الأبعاد؟ سوف أبرهن على أنه، إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد فلن تكون النتائج الكينماتية للنسبية الخاصة مستحيلة فحسب، وإنما قد يكون الدليل التجريبي الذي يؤكد صحتها هو نفسه مستحيلاً إذا ما كان الكون ثلاثي الأبعاد.

٥,١ هل طرحت النسبية الخاصة التحدي الفكري الأكبر للجنس البشري؟

تمخض عن النسبية الخاصة واحدة من أصعب المشكلات التي طرحها العلم، ليس للعلماء والفلاسفة فقط، ولكن لأي ممثلين عن الجنس البشري يريدون أن تكون رؤيتهم الكونية منسجمة مع العلم الحديث. السؤال الرئيسي عما إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد أم رباعي الأبعاد نشأ من قضية الوضع الأنطولوجي(**) لزمكان مينكوفسكي الذي أدى إلى مأزق واضح: ينبغي النظر إلى زمكان

(*) لأننا سوف نتعامل في هذا الفصل مع النسبية الخاصة، فمن الواضح أننا سوف نتطرق إلى قضية طبيعة زمكان مينكوفيسكي. ولكن سوف تكون أي استنتاجات عن طبيعة زمكان مينكوفيسكي سارية لأي زمكان نسبوي، لأن النتائج الكينماتية للنسبية الخاصة التي سوف تفحص هنا تكون سارية في النسبية العامة أيضًا.

(**) الأنطولوجيا Ontology أحد بحوث الفاسفة المعني بالنظر في الوجود بإطلاق، مجردًا من كل تعيين أو تحديد. وهو عند أرسطو علم الموجود بما هو موجود، وبهذا يسمى بمبحث الميتافيزيقا العام – ويترك البحث في الوجود من نواحيه المختلفة للعلوم الطبيعية والرياضية والإنسانية. ومن ثم يعرّف أنطولوجيا العلم بأنه أحد علوم العلم الذي يعني بالبحث في كشف طبيعة الوجود اللامادي في القضايا الميتافيزيقية المترتبة على التصورات أو المفاهيم والقوانين العلمية مثل المادة والطاقة والزمان والمكان والكم والكيف والقانون والعلة والمعلول، وغيرها [المترجم]

مينكوفسكي إما على أنه لا شيء أكثر من فضاء رياضياتي يمثل كونًا ثلاثي الأبعاد متطورًا في الزمن (الحاضر) أو على أنه نموذج رياضياتي لكون رباعي الأبعاد موجود سرمديًا يُعطَى فيه الزمن كليًا كبعد رابع.

إن التضمينات لكون رباعي الأبعاد تكون عميقة جدًا بالنسبة إلى عدد من القضايا الجوهرية مثل الصيرورة الزمانية، انسياب الزمن، الإرادة الحرة، وحتى الوعي – في كون كهذا (يسمى عادة بالكون الكتْلي) تُعطى التواريخ الزمنية الكاملة لجميع الأجسام الفيزيائية ككيانات مكتملة رباعية الأبعاد (أنابيب كونية للجسم) لأن جميع لحظات الزمن لا "تبدأ في التحقق" واحدة تلو الأخرى لتصبح اللحظة 'الآن'، ولكنها تشكل البعد الرابع للكون، وبالتالي تُعطَى جميعها دفعة واحدة. وإذا فُهمت الصيرورة الزمانية و انسياب الزمن بالطريقة التقليدية – كربطها بأجسام ثلاثية الأبعاد وكون ثلاثي الأبعاد يصمد خلال الزمن – فلن يكون هناك صيرورة، ولا انسياب زمن، ولا إرادة حرة في كون رباعي الأبعاد. تضمينات النسبية هذه هي التي طرحت ما قد يكون أكبر تحدٍّ فكري واجهه الجنس البشري في أي وقت مضى.

إن رد فعل الفيزيائيين والفلاسفة لهذا التحدي مختلف تمامًا، مع وجود المخاطر على أعلى مستوى. الإجابة الأكثر شيوعًا على سؤال: "ما هي بُعْدِيّة الكون طبقًا للنسبية؟" المعطاه من قبل الفيزيائيين، وبالأخص علماء النسبية هي: "بالطبع، الكون رباعي الأبعاد." ولكن عندما يُسألون عن تضمينات مثل ذلك الكون رباعي الأبعاد (وليس الفضاء الرياضياتي رباعي الأبعاد)، يبدأون في إدراك أن النسبية تطرح مشاكل تفسيرية جادة. فلاسفة العلوم هم الأفضل في ذلك، ربما لأن أحد مبررات وجودهم هو بالتحديد تفسير النظريات العلمية. مع الأسف، هناك نمط يُكتَشَف بسهولة – بعض فلاسفة العلم الذين يكتبون عن قضايا متعلقة بأنطولوجيا الزمكان اعتبروا

منظور الكون الكتْلي خاطئًا بما لا يدع مجالاً للشك، ويعتقدون أنه لابد من وجود نوع ما من صيرورة موضوعية وانسياب زمني. إن الافتراض بأن الكون لا يمكن أن يكون رباعي الأبعاد يُعتبر أحيانًا بالغ الوضوح لدرجة أن أي محاولات للتشكيك فيه تقابل فعليًا باللوم. في عام ١٩٩١ قام شتاين [٢٩] بانتقاد حجة ريتديجك – بوتنام – ماكسويل [٣٠،٣١،٣٢] التي تفيد أن النسبية الخاصة تقتضي ضمنًا أن يكون الواقع هو كون رباعي الأبعاد. برهن شتاين على أن استخدامهم لمفهوم " أحداث الحاضر البعيدة" فيه مغالطة [٢٩، ص ١٢٥]: "حقيقة أن تلك المغالطة (مرة أخرى، إذا كنتُ مصيبًا) ليست فقط مستمرة بين بعض الكتَّاب، ولكن سمح بها محكمون لتجد نشرًا مستمرًا، هي ظاهرة تدعو في حد ذاتها إلى التفكير." وإذا نحينا جانبا مسألة ما إذا كان شتاين له ما يبرره في اتخاذ مثل هذا التصريح، فسوف يُناقش في القسم التالي ما إذا كان مصيبًا في اعتراضه على استخدام " أحداث الحاضر البعيدة" في إطار النسبية الخاصة.

٥,٢ النسبية وبُعْدِية الكون

إن محاولة تجنب التحديات المطروحة بواسطة تفسير زمكان مينكوفسكي هي مناقشة جوهر الوجود لمعضلة ثلاثي الأبعادارباعي الأبعاد. وقد تم فعل ذلك ضمنيًا بواسطة شتاين [٢٩، ٣٣] في نقده لحجة ريتديجك – بوتنام – ماكسويل الذي يستفيد من تلك المعضلة. لقد برهن أن ريتديجك وبوتنام وماكسويل كانوا مخطئين لأنهم استخدموا بالخطأ مفهوم أحداث الحاضر البعيدة والذي يعتمد على التقسيم قبل النسبوي للأحداث إلى ماضي، وحاضر ومستقبل [٢٩ ص ١٥٩]: "الفكرة المعقولة الوحيدة في نظرية النسبية عن "الحاضر عند نقطة زمكان" هي تلك التي تخص فقط علاقة

التطابق: الحاضر عند نقطة معلومة هو تلك النقطة وحدها – حرفيًا "الآن– هنا"." لم تتم الإشارة حتى الآن إلى أن نقد شتاين لمفهوم أحداث الحاضر البعيدة في النسبية مُوَجَّهٌ بالأحرى ضد الآنيّة والبُعْدِيَّة الثلاثية للكون، وليس ضد حجة ريتديجك – بوتنام – ماكسويل. يصبح هذا مؤكدًا عندما يُؤخذ في الاعتبار حقيقة أن الطريقة الوحيدة لتعريف الحاضر (الكون ثلاثي الأبعاد الموجود عند لحظة 'الآن') تكون بدلالة التقسيم قبل النسبوي للأحداث. كان ما بيّنه ريتديجك وبوتنام هو أن الرؤية الشائعة للكون (الآنيّة) تكون غير صحيحة عند أخذ نسبية التزامن في الاعتبار، وبالتالي ينبغي النظر إلى الواقع على أنه كون رباعي الأبعاد. قام شتاين بفعل الشيء نفسه تمامًا وذلك بالنسبة للنصف الأول من حجتهم – فقد برهن على أنه لا يمكن التكلم عن أحداث الحاضر البعيدة في النسبية، مما يعني أن التقسيم قبل النسبوي للأحداث إلى ماضي، وحاضر ومستقبل لا يمكن استخدامه، وبالتالي لا يمكن لمراقب أن يعَرِّف حاضره (أو كونه ثلاثي الأبعاد) في إطار النسبية. قام شتاين بنقد ريتديجك وبوتنام لمجادلتهما في أن نسبية التزامن تقتضي ضمنًا وجود كون رباعي الأبعاد، ولكنهما لم يفسرا كلاً من كيفية أن تكون نسبية التزامن ممكنة لو لم يكن الكون رباعي الأبعاد ولا ما قد تكون عليه بُعْدِيَّة الكون طبقًا للنسبية. يبدو من غير الواقعي تمامًا افتراض أن شتاين يؤيد وجهة نظر يُستند إليها في اعتبار حدث ما مفرد – الحدث "الآن – هنا" – على أنه الحدث الواقعي الوحيد، وذلك لأن تلك النظرة تبلغ بوضوح حالة أنانة الحدث.(*)

(*) الأنانة solipsism تعني أبستمولوجيا القول بأن الإنسان لا يعرف إلا ذاته وأحوال ذاته، ويراد بها ميتافيزيقيا القول بأن الأنا وحده (أي النفس الفردية) هو الموجود، ويريد المؤلف أن ينسحب هذا المعنى الفلسفي على أي حدث مفرد فيما أسماه event solipsism [المترجم]

حقيقة أن الآنيّة تعتمد على التقسيم قبل النسبوي للأحداث لا تشكل بعد تناقضًا واضحًا مع النسبية وذلك لسببين. أولاً، أن أنصار الآنيّة بإمكانهم برهنة أن السببية النسبية (عاكسة وجود حد علوي لمقدار سرعة التأثرات الفيزيائية) لا تبدو أنها تستبعد امكانية أن الواقع يمكنه أن يكون كونًا ثلاثي الأبعاد. قد يقولون إن الكون العادي ثلاثي الأبعاد يعتمد بالفعل على التقسيم قبل النسبوي للأحداث إلى ماضي، وحاضر ومستقبل، ولكن هذا لا يعني أن الأجسام ثلاثية الأبعاد الموجودة عند اللحظة الحاضرة لمراقب ما يمكنها التأثر عند تلك اللحظة. إضافة إلى ذلك، من الواضح أن جوهر الوجود للأجسام لا يعتمد على ما إذا كانت تتأثر أم لا (عند لحظة وجودها). يمكن لأنصار الآنيّة أن يشيروا إلى أن كل جسم يقع خارج المخاريط الضوئية للأجسام الأخرى في الكون ثلاثي الأبعاد لمراقب معين. مثل هذا النموذج، في سياق مختلف، نوقش بواسطة ديكس [٣٤]. ثانيًا، كما سنرى أدناه، نسبية التزامن، وتقلّص الطول، وتمدد الزمن كلها أشياء تقتضي ضمنًا التقسيم قبل النسبوي للأحداث عندما تُثار صراحة قضية وجود الأجسام التي تشملها تلك التأثيرات.

ناقش ماك كول ولوي صراحة في بحث حديث [٣٥] معضلة ثلاثي الأبعادارباعي الأبعاد. وتعتمد حجتهم الرئيسية على حقيقة أن "الوصفين ثلاثي الأبعاد ورباعي الأبعاد للكون متكافئان" وبالتالي "لا محلّ لمسألة أن أحدهما صحيح والآخر خطأ" [٣٥ ص ١١٤]. لقد برهنا على أن تكافؤ الوصفين ثلاثي الأبعاد ورباعي الأبعاد للكون دليل على أن النزاع حول أنطولوجية ثلاثي الأبعادارباعي الأبعاد لا تعكس مشكلة واقعية. حتى لو

اتفقنا على أن الوصفين متكافئان(*)، فلا يمكننا الحديث عن تكافؤ بين أنطولوجيتي ثلاثي الأبعاد ورباعي الأبعاد. إن بُعْدِيَّة كيان فيزيائي تُعتبر إحدى "الخصائص" الأساسية التي تحدد جوهر طبيعته الحقيقية. إنها مثل الوجود – تمامًا مثلما لا يمكن لكيان ما أن يكون موجودًا وغير موجود معًا، فلا يمكنه أن يكون ثلاثي الأبعاد ورباعي الأبعاد معًا. ولأن الرؤية المقبولة هي أن البُعْدِيَّة خاصية داخلية للكون، ينتج من ذلك أن الكون إما أنه ثلاثي الأبعاد أو رباعي الأبعاد، وأي زعم بعدم وجود قضية ثلاثي الأبعادارباعي الأبعاد ينبغي أن يُفسر بوضوح السبب في خطأ الرأي المقبول عن البُعْدِيَّة.

أي محاولة لتجنب التحديات من تفسير زمكان مينكوفسكي عن طريق الدفاع عن الرؤية التقليدية للآنيَّة أو ثلاثية البعدية محكوم عليه بالفشل لأن هذه النظرة تؤدي إلى تناقض مباشر مع النسبية. إن الآنيَّة هي رؤية قبل نسبوية للواقع لأنها تعتمد على التزامن المطلق – يُعَرِّف الحاضر (الكون العادي ثلاثي الأبعاد) على أنه أي شيء موجود *بالتزامن* عند لحظة 'الآن'. وبما أن الآنيَّة مُعَرَّفة بدلالة التزامن، فإن نسبية التزامن لها تأثير مباشر على هذه الرؤية: عند وجود مجموعتين مختلفتين من الأحداث المتزامنة، يكون لدى ملاحظين في حالة حركة نسبية حاضران مختلفان وبالتالي كونان مختلفان ثلاثيا الأبعاد. هذا يوضح أن الآنيَّة التقليدية تناقض نسبية التزامن: لو كان الحاضر هو الموجود فقط، عندئذ قد يكون لجميع الملاحظين الذين يكونون في حالة حركة نسبية حاضر مشترك، وبالتالي مجموعة مشتركة من الأحداث المتزامنة؛ وبذلك قد تكون نسبية التزامن مستحيلة. على الرغم من

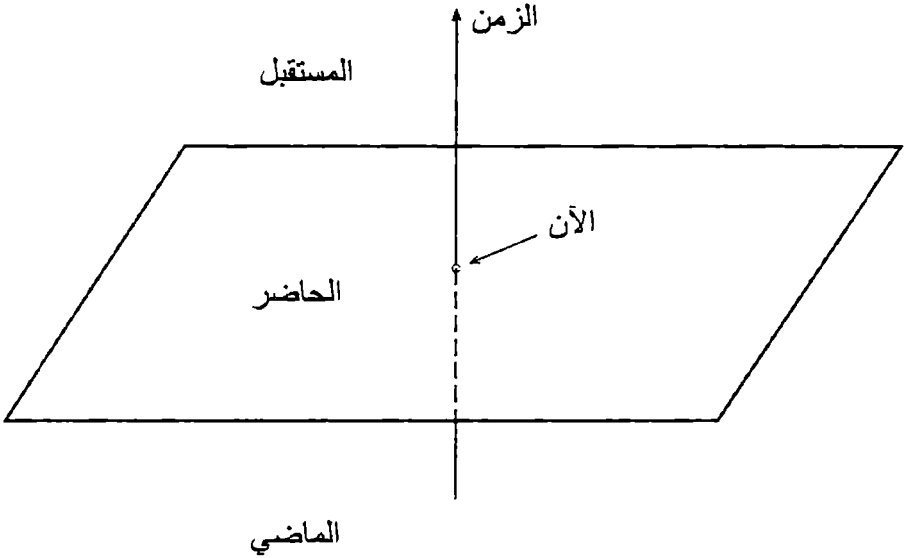
(*) لا يمكن تمثيل النسبية العامة بشكل كافٍ بلغة الأبعاد الثلاثية.

ذلك، القول بأن "أي شخص يأخذ النسبية بمحمل الجد لا يستطيع أن يأخذ الآنيّة بمحمل الجد" [٣٦، ص ٢٢٥] (انظر أيضًا [٣٧، ٣٩، ٤٠] و [٤١، قسم ١,٤]) ربما يكون نوعًا من التسرع بعض الشيء، مع أنهما في النهاية على صواب، كما سنرى فيما بعد. الآنيّة التقليدية تناقض النسبية مباشرة فقط عند اعتبار وجود الكون والأجسام الفيزيائية كيانات *مطلقة* (غير معتمدة على المراقب – أو الإطار). باعتبار هذا في أذهاننا يبدو أنه هناك طريقتان ممكنتان فقط لتجنب التناقض مع نسبية التزامن:

• إحداهما هي الحفاظ على مطلقية الوجود، ولكن بالتخلي عن البُعْدِيّة الثلاثية للكون. في هذه الحالة يكون الكون، الذي يكون وجوده مطلق، رباعي الأبعاد ويُمَثّل بزمكان مينكوفسكي. إن مراقبين في حالة حركة نسبية، سوف يشاهدان، باستخدام لغة الأبعاد الثلاثية العادية، "شريحتين" مختلفتين ثلاثيتي الأبعاد من الزمكان المطلق الموجود على أنهما حاضرهما.

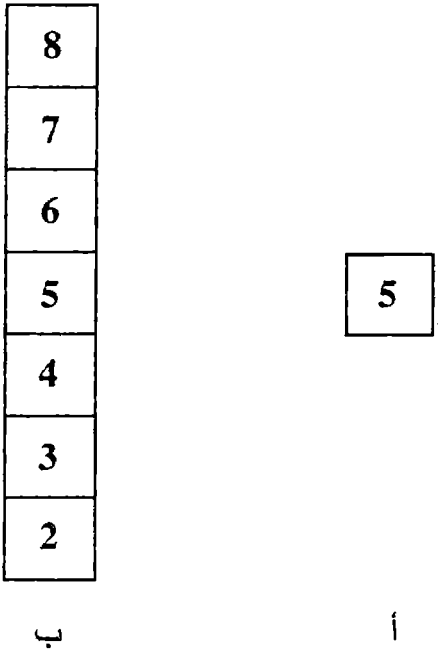
• الأخري هي الحفاظ على البُعْدِيّة الثلاثية للكون، ولكن بالتخلي عن مطلقية الوجود. في هذه الحالة يكون الكون كونًا ثلاثي الأبعاد ذا وجود مُنَسبَن – أي لا يعتمد على المراقب – أو الإطار. سيكون لدى مراقبين في حالة حركة نسبية كونان (حاضران) مختلفان ثلاثيا الأبعاد، ولكن سيزعم كل منهما أن كونه الخاص ثلاثي الأبعاد هو فقط الموجود.

يجب التأكيد تحديدًا على أن الوجود المُنَسبَن لجسم ما لا يعني أن مراقبين في حالة حركة نسبية يصفان وجود الجسم ثلاثي الأبعاد نفسه بالنسبة إلى إطارهما الإسنادي. هذا يعني، كما سنرى فيما بعد، أن المراقبين لديهما جسمان مختلفان ثلاثيا الأبعاد، ولهذا السبب يكون وجود الجسم مُنَسبَنًا أنطولوجيًا.



شكل ٥,١ طبقًا لأنصار الآنيّة، الحاضر فقط – الكون ثلاثي الأبعاد عند لحظة 'الآن' – هو الموجود.

دعني أفسر ذلك بتفصيل أكثر. من أجل هذا، ولأجل تحليل التأثيرات النسبوية اللاحق، سيكون من الضروري أن أطرح صراحة السؤال: ما هي بُعْدِيَّة الكون على المستوى الماكروي؟ (أو ما هي بُعْدِيَّة الكون طبقًا للنسبية؟).



شكل ٥,٢ (أ) طبقًا للرؤية البُعْديّة الثلاثية ، تكون الساعة الرقمية موجودة فقط عند اللحظة الحاضرة. (ب) في رؤية البُعْديّة الرباعية، تكون الساعة الرقمية موجودة عند جميع لحظات تاريخها كجسم رباعي الأبعاد يسمى الأنبوب الكوني للساعة.

طرح سؤال بُعْديّة الكون والأجسام الفيزيائية يمكّننا من الاقتراب من قضية وجود الماضي والمستقبل في الرؤية الآنيّة من زاوية مختلفة. في الرؤية الآنيّة، يبدو القول بأن الماضي والحاضر غير موجودين أنه يتضمن تناقضًا في المصطلحات: بما أن ما هو موجود يكون كذلك فقط عند لحظة 'الآن'، فإن عدم وجود الماضي والحاضر يبدو أن له معنى فقط إذا كانا غير موجدين في الحاضر. على الرغم من ذلك، تبدو الأشياء مختلفة عندما يُسأل سؤال بُعْديّة الكون صراحة. وبما أنه في الرؤية الآنيّة، يكون "الموجود"

و"الموجود الآن" متكافئين، فإن الواقع الوحيد هو الحاضر – الكون ثلاثي الأبعاد المتكون من جميع الأجسام ثلاثية الأبعاد، والمجالات، والفضاء ثلاثي الأبعاد المتواجدة جميعًا بالتزامن عند لحظة 'الآن' (شكل ٥,١). الماضي هو مجموعة *الحالات* السابقة للكون ثلاثي الأبعاد، بينما يكون المستقبل هو مجموعة *حالات* الكون ثلاثي الأبعاد الآتية. لهذا يكون الماضي والحاضر غير موجودين في الرؤية الآنيّة – هما مجرد حالتين للكون ثلاثي الأبعاد الموجود فحسب عند اللحظة الحاضرة. لو وُجِد الكون عند اللحظات الأخرى أيضًا، لما كان ثلاثي الأبعاد، وإنما يكون رباعي الأبعاد.

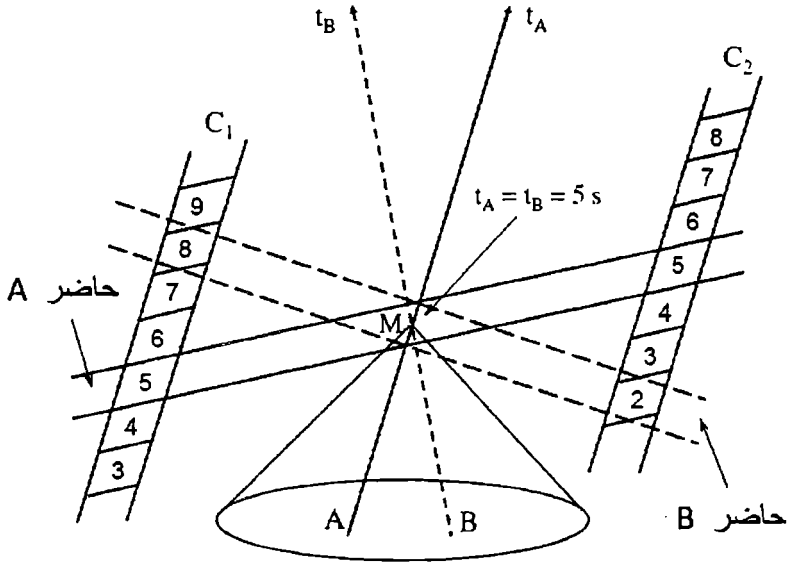
يمكن توضيح هذا عن طريق النظر إلى طريقة تفكير أنصار الرؤية البُعْدِيّة الثلاثية (أنصار الآنيّة) والرؤية البُعْدِيّة الرباعية بشأن الجسم الفيزيائي. كما ناقشنا في قسم ٤,١، طبقًا للرؤية التقليدية (الرؤية البُعْدِيّة الثلاثية)، تكون الساعة الرقمية موجودة فقط عند لحظتها الحاضرة المنتظمة التغير الموضحة بالثانية الخامسة على شاشتها، بمعنى، أن الساعة تكون موجودة عند الثانية الخامسة من زمنها الحقيقي؛ تذكر أن الزمن الحقيقي لجسم يُقاس بواسطة ساعة موضوعة عند النقطة التي يكون عندها الجسم (شكل ٥,٢ أ). يُؤكد أنصار الآنيّة أن الساعة غير موجودة في ماضيها ولا مستقبلها. فهي تحفظ هويتها كجسم ثلاثي الأبعاد – تكون عند كل لحظات تاريخها هي *نفس* الساعة ثلاثية الأبعاد.

يؤمن أنصار البعدية الرباعية أن ما هو واقعي هو الأنبوب الكوني للساعة – وهو جسم رباعي الأبعاد يمثل الساعة عند جميع لحظات تاريخها (شكل ٥,٢ ب). عند كل لحظة مختلفة تكون الساعة جسمًا مختلفًا ثلاثي الأبعاد ("شريحة" مختلفة من الأنبوب الكوني للساعة)، مما يعني أنها لا تحتفظ بهويتها كجسم ثلاثي الأبعاد. على رغم من ذلك، ما يجعل الساعة هي

الساعة نفسها هو حقيقة أنها تحفظ هويتها كجسم رباعي الأبعاد – فهي جسم متصل رباعي الأبعاد والذي لا يكون منقسمًا بموضوعية إلى "شرائح" ثلاثية الأبعاد (أو مقاطع عرضية ثلاثية الأبعاد). نتكلم عن "الشرائح" ثلاثية الأبعاد في إطار النسبية فقط عندما نستخدم لغتنا اليومية ثلاثية الأبعاد، مما يعكس حقيقة أننا ندرك صورًا ثلاثية الأبعاد من الجسم الفيزيائي. يوضح شكل ٥,٢ لماذا يمكن لجسم ثلاثي الأبعاد أن يتواجد فقط عند لحظة واحدة (عند اللحظة الحاضرة من وقته الحقيقي)؛ إذا تواجد جسم عند أكثر من لحظة واحدة، عندئذ يكون هذا الجسم رباعي الأبعاد(*) – مثل الأنبوب الكوني للساعة في شكل ٥,٢ ب. يمثل شكلا ٥,٢ أ و ب الرؤيتين البعدية الثلاثية والبعدية الرباعية بشأن ما تكون عليه الساعة. ويكون السؤال الضروري هو ما إذا كان بالإمكان تبيين أي هاتين الرؤيتين التباديليتين تناقض النسبية.

نحن الآن في موقف نرى فيه لماذا يمكن للآنيّة أن تتوافق مع النسبية فقط إذا كان وجود الكون والأجسام الفيزيائية مُنَسْبَنًا أنطولوجيًا. اعتبر مراقبين A وB في حالة حركة نسبية، أنبوبا كونهما موضحين في شكل ٥,٣. الساعتان C_1 وC_2 ساكنتان في إطار إسناد مراقب A وممثلتان أيضًا بأنبوبي كونهما. باستخدام شكل ٥,٣ سنحاول تعيين ما إذا كان بإمكان نظرية النسبية (بتحديد أكثر، نسبية التزامن) مساعدتنا في تعيين أي من الرؤيتين – البُعْدِيّة الثلاثية (شكل ٥,٣ أ) أم البُعْدِيّة الرباعية (شكل ٥,٣ ب) – هي الرؤية الصائبة.

(*) شكل ٥,٢ ليس دقيقًا جدًا من ناحية ما – وهي أن شاشتي الساعتين ممتدتان في البعد الرابع؛ ينبغي تمثيل الساعات ثلاثية الأبعاد بخطوط أفقية فقط.



شكل ٥,٣ ساعتان C_1 وC_2 ساكنتان بالنسبة إلى مراقب A وممثلتان بأنبوبي كونهما. تقتضي نسبية التزامن ضمناً أن يكون لمراقبين A وB، في حالة حركة نسبية، زوجان مختلفان من الساعات ثلاثية الأبعاد متواجدان في حاضريهما. ينبغي أن تكون كل من الساعتين متواجدة عند لحظتين من لحظات تاريخها لكي تكون نسبية التزامن ممكنة. مثلاً، تتواجد الساعة C_1 عند الثانية الخامسة من وقتها الحقيقي بالنسبة إلى A وعند الثانية الثامنة من وقتها الحقيقي بالنسبة إلى B.

عند اللحظة التي يتقابل فيها المراقبان عند الحدث M، يضبطان ساعتهما الخاصة (الموضوعتان حيث يوجد المراقبان) عند الثانية الخامسة من زمنهما الحقيقي: $t_A = t_B = 5s$. طبقًا للنسبية الخاصة، يكون لدى A وB مجموعتان مختلفتان من الأحداث المتزامنة. دعنا نرى الآن ما المعنى الفيزيائي لنسبية التزامن عن طريق السؤال صراحة عن وجود وبُعْدِيَّة

الساعتين. في [illegible] (بالتعرف فقط على وجود الأجسام ثلاثية الأبعاد)، كل ساعة موجودة فقط عند لحظة 'الآن' من زمنها الحقيقي، كما هو مبين في شكل ٥,٢. طبقًا لمراقب A، تتواجد كلتا الساعتين عند الثانية الخامسة من الزمن الإحداثي المُقاس في إطار إسناد A. ولأنه إطار الإسناد القصوري، يتطابق الزمن الإحداثي (العالمي) مع الأزمنة الحقيقية لجميع الأجسام الساكنة في ذلك الإطار، ينتج من ذلك أن يتوصل A إلى استنتاج أن C_1 وC_2 تتواجدان كلتاهما عند الثانية الخامسة من زمنيهما الحقيقي. في الواقع، بالنسبة لأنصار الآنيّة، ينبغي أن تكون جميع الأجسام الموجودة في حاضر A (بصرف النظر عما إذا كانت ساكنة في إطار A أو متحركة بالنسبة إلى A) متواجدة عند اللحظات الحاضرة من أزمنتها الحقيقية، لأن الجسم يتواجد فقط عند لحظة 'الآن' من زمنه الحقيقي طبقًا للرؤية الآنيّة. هذا يعني أنه من الحتمي أن تكون اللحظات الحاضرة من الأزمنة الحقيقية لجميع الأجسام الموجودة في حاضر A متزامنة بالنسبة إلى A.

لكن ما هو متزامن بالنسبة إلى A لا يكون متزامنًا بالنسبة إلى B. كما هو مبين في شكل ٥,٣، المتزامن بالنسبة إلى B عند الثانية الخامسة من زمن B (عندما يتقابل B مع A عند M) هي الساعة C_1 الموجودة عند الثانية الثامنة من زمنها الحقيقي و الساعة C_2 الموجودة عند الثانية الثانية من زمنها الحقيقي. لهذا، تكون لحظة 'الآن' من زمن C_1 الحقيقي بالنسبة إلى B هي الثانية الثامنة من زمنها الحقيقي، بينما تكون لحظة C_2 الحاضرة هي الثانية الثانية من زمنها الحقيقي. إذًا عندما يتقابل B مع A عند M، سوف يختلفان على ما هي اللحظة الحاضرة لكل من الساعتين، وعلى ما يكون متواجدًا بالنسبة لهما عند لحظة اللقاء (عند الثانية الخامسة من زمن A والثانية الخامسة من زمن B): بالنسبة إلى A تتواجد كل من الساعتين عند الثانية

الخامسة من زمنها الحقيقي (عند 'الآن' الخاص بها بالنسبة إلى A)، بينما بالنسبة إلى B تتواجد الساعة C_1 عند الثانية الثامنة من زمنها الحقيقي (عند 'الآن' الخاص بها بالنسبة إلى B) وتتواجد الساعة C_2 عند الثانية الثانية من زمنها الحقيقي (عند 'الآن' الخاص بها بالنسبة إلى B). وبذلك فإن نسبية التزامن تكون ممكنة في إطار الرؤية الآنيّة لو تواجد زوجان مختلفان من الساعات بالنسبة إلى A وB عند M (وعند أي لحظة من زمنيْ A وB بينما يكون الملاحظان في حالة حركة نسبية). عند الحدث M، يتواجد زوج واحد من الساعات متزامناً مع M بالنسبة إلى A ويتواجد زوج آخر متزامناً مع M بالنسبة إلى B. يكون هذا ممكناً فقط لو أن كلتا الساعتين تتواجدان كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد عند كل لحظة مختلفة من زمنها الحقيقي. مثلاً، عندما يتقابل A مع B عند M، تتواجد C_1 كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد بالنسبة إلى A وB – الأول يتواجد عند الثانية الخامسة من زمن C_1 الحقيقي وينتمي إلى حاضر A، والآخر يتواجد عند الثانية الثامنة من زمن C_1 الحقيقي وينتمي إلى حاضر B. (يسري هذا الاستنتاج عند كل لحظة من زمنيْ A وB بينما يكونان في حالة حركة نسبية.)

النتيجة المباشرة لنسبية التزامن (كما صُوِّرت في شكل ٥,٣) بأن جسمًا معينًا يتواجد كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد عند كل لحظة مختلفة من تاريخه تبدو أنها تناقض الرؤية الآنيّة من حيث إن الجسم الفيزيائي يحتفظ بهويته كجسم ثلاثي الأبعاد خلال الزمن (كما هو مبين في شكل ٥,٢ أ). على الرغم من ذلك، لكي نرى التناقض بين الآنيّة والنسبية، نحتاج إلى توضيح ما نعنيه بقول "جسم موجود بالنسبة لمراقب". بمعنى آخر، يجب أن نذكر صراحة ما إذا كان وجود الجسم مطلقًا (لا يعتمد على المراقب – أو الإطار) أو نسبيًا (يعتمد على المراقب – أو الإطار).

لو نُظر للوجود على أنه مطلق، فسيكون واضحًا من مناقشة نسبية التزامن لماذا تتناقض الآنيّة التقليدية (بفرض أن جسمًا ما موجود فقط عند لحظته الحاضرة) مباشرة مع النسبية – لو تواجدت الساعتان عند الثانية الخامسة من زمنهما الحقيقي، لكان من الحتمي أن يُقِر جميع المراقبين الموجودين في حالة حركة نسبية هذه الحقيقة، وبالتالي كان سيتواجد نفس زوج الساعات ثلاثية الأبعاد نفسها (الساعتان الموجودتان عند ثانيتهما الخامسة) بالتزامن بالنسبة إلى A وB عند M. من الواضح أن هذا قد يعني أن التزامن قد يكون مطلقًا.

إذا نظر أنصار الآنيّة لوجود الساعتين على أنه مطلق ولكنهم، من وجهة نظر نسبية التزامن، اتفقوا على أنه يتواجد عند M زوجان مختلفان من الساعات ثلاثية الأبعاد بالنسبة إلى A وB، فلسوف يصلون حتمًا إلى رؤية البعدية الرباعية: سوف تتواجد كل من الساعتين C_1 وC_2 عند لحظتين من زمنها الحقيقي، ويكون هذا ممكنًا فقط إذا كانت الساعتان جسمين رباعيي الأبعاد، كما هو موضح بالرسم في شكل ٥,٢ ب. الطريقة الوحيدة لكي تتجنب الآنيّة التناقض المباشر مع النسبية تكون بالنظر إلى وجود الساعتين ثلاثيتي الأبعاد على أنه مُنَسْبَن. في التصور المُنَسْبَن للآنيّة، يختلف المراقبان على ما هو موجود – بالنسبة لمراقب A، تكون الساعة C_1 غير موجودة عند ثانيتها الثامنة لأنها تقع في مستقبل A؛ وتكون C_2 غير موجودة هي أيضًا في ثانيتها الثانية لأنها وجدت بالفعل عند لحظة ما قبل اللقاء بثلاث ثوان، وبالتالي تكون في ماضي A. وينكر المراقب B وجود C_1 وC_2 عند ثانيتهما الخامسة لأن C_1 عند ثانيتها الخامسة تكون في ماضي B، بينما C_2 عند الثانية الخامسة من زمنها الحقيقي تكون في مستقبل B. كل هذا يعني أن كل مراقب يعترف فقط بوجود زوج الساعات ثلاثية الأبعاد المنتمي إلى حاضر، ولكنه ينكر وجود زوج الساعات ثلاثية الأبعاد الذي يكون جزءًا من حاضر مراقب آخر.

من وجهة نظري، مفهوم الوجود المستخدم بواسطة التصور المُنَسْبَن للآنيّة متشابك للغاية لدرجة أنه من النادر أن تُعجب الطبيعة بهذا الدفع بالخيال البشري إلى ذلك التطرف الذي يسمح لمراقب A أن يزعم أن C_1 عند ثانيتها الثامنة تكون غير موجودة بالنسبة له ولكنها تكون موجودة بالنسبة إلى B. إلا أنه حتى التصور المُنَسْبَن للآنيّة لا يمكنه إنكار نتيجة نسبية التزامن التي تقضي بأن أي زوجين *مختلفين* من الساعات يكونان موجودين بالنسبة إلى A وB، مما يعني أن كل ساعة تكون موجودة كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد عند اللحظات المختلفة من زمنها الحقيقي. عند نفس الحدث M، يزعم المراقبان A وB أن الساعة C_1 تكون موجودة كجسمين مختلفين ثلاثيي الأبعاد بالنسبة لهما: تكون C_1 المتواجدة عند ثانيتها الخامسة متزامنة مع M بالنسبة إلى A (وبالتالي توجد بالنسبة إلى A عند لحظة اللقاء $t_A = 5s$)، بينما تكون C_2 المتواجدة عند ثانيتها الثامنة متزامنة مع M بالنسبة إلى B (وبالتالي تتواجد بالنسبة إلى B عند لحظة اللقاء $t_B = 5s$). يقر المراقب A بوجود الساعة C_1 عند ثانيتها الخامسة عندما يقابل B عند M، ولكنه يعلم (بسبب نسبية التزامن) أن C_1 موجودة أيضًا عند ثانيتها الثامنة كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد بالنسبة إلى B عند لحظة اللقاء. يكون B في الموقف نفسه – فهو يقر بوجود الساعة C_1 عند ثانيتها الثامنة، ولكنه يعلم أن C_1 موجودة أيضًا عند ثانيتها الخامسة كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد بالنسبة إلى A. يبين هذا لماذا يكون الثمن الذي ينبغي على الآنيّة أن تدفعه لتجنب التناقض المباشر مع النسبية هو نسبنة الوجود أنطولوجيًا.

إن نتيجة نسبية التزامن التي تقضي بأن جسمًا ما معينًا يتواجد كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد عند كل لحظة مختلفة من تاريخه تكون متسقة بالكامل مع تعريف حدث ما في النسبية (نوقشت في الفصل الرابع): جسم ما (أو نقطة مجال، أو نقطة في الفضاء) عند لحظة معينة من زمنه الحقيقي. لقد رأينا في الفصل الرابع أننا لا نستطيع أن نتكلم في النسبية عن أحداث مختلفة تقع مع

الجسم ثلاثي الأبعاد نفسه لأن ذلك الكلام قد يكون متناقضًا في المصطلحات. لرؤية هذا بصورة أفضل، اعتبر مرة أخرى الساعة C_1. بالنسبة إلى A وB، يكون أي حدثين مصاحبين للساعة C_1 متزامنين مع M – يكون الحدث "C_1 الموجود عند ثانيته الخامسة" متزامنًا مع M بالنسبة إلى A، بينما يكون الحدث "C_1 الموجود عند ثانيته الثامنة" متزامنًا مع M بالنسبة إلىB. على الرغم من ذلك، يكون هذان الحدثان المختلفان جسمين مختلفين ثلاثيي الأبعاد– الساعة C_1 عند ثانيتيها الخامسة والثامنة. إذا لم توجد C_1 كجسمين مختلفين ثلاثيي الأبعاد عند ثانيتيها الخامسة والثامنة، لما كانت نسبية التزامن ممكنة سواء اعتبر الوجود مطلقًا أو نسبيًا: لو أن الوجود مطلق، فإن C_1، التي تكون جسمًا ثلاثي الأبعاد وحيدًا موجودًا فقط عند لحظته الحاضرة، تكون موجودة إما عند ثانيتها الخامسة أو الثامنة بالنسبة إلى كل من A وB؛ وإذا كان الوجود نسبيًا، فإن C_1 تكون موجودة عند ثانيتها الخامسة بالنسبة إلى A، ولكن A يعلم أنه لكي تكون نسبية التزامن ممكنة، ينبغي أن تكون C_1 موجودة(*) عند ثانيتها الثامنة كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد بالنسبة إلى B عند لحظة اللقاء $t_B = 5s$ (وإلا تكون نسبية التزامن مستحيلة).

الفيصل هو الفهم السليم لما هية الحدث في النسبية، لأن المرء قد يميل للاعتقاد بأن الجسم ثلاثي الأبعاد نفسه يكون موجودًا بالنسبة إلى مراقبين في حالة حركة نسبية (مما يبدو أكثر من واضح(**) طبقًا لخبرتنا اليومية!)، ولكن أحداثًا مختلفة من هذا الجسم هي ما يدركها المراقبون. استحالة وجود زوج واحد من الساعات ثلاثية الأبعاد بالنسبة لكلا المراقبين A وB سوى أن تكون

(*) مثلما يبين هذا المثال، أي تحليل لمفهوم الوجود المُنَسبَن في إطار النسبية الخاصة يكشف عن خلو هذا المفهوم من أي معنى أو مغزى.

(**) إنه بالفعل الجسم نفسه الذي يكون موجودًا بالنسبة إلى كلا المراقبين، ولكنه ليس الجسم ثلاثي الأبعاد نفسه؛ إنه الجسم رباعي الأبعاد نفسه – الخط الكوني للجسم الفيزيائي قيد البحث – هو الذي يكون موجودًا بالنسبة إلى كلا المراقبين.

قراءتنا لهاتين الساعتين مختلفة بالنسبة للمراقبين هو أمر جلي من حقيقة أن المتزامن بالنسبة للمراقبين ليس هو ما يشاهدانه عند لحظتيهما الحاضرة، وإنما هو ما يوجد بالتزامن مع لحظتيهما "الآن". سوف يرى كلا المراقبين عند M الشيء نفسه تحديدًا – المخروط الضوئي الماضي عند الحدث M (شكل ٥,٣). ولهذا فإن حقيقة أن يكون لدى مراقبين في حالة حركة نسبية مجموعتان مختلفتان من الأحداث، لا تعني أن المراقبين لديهما مجموعتان مختلفتان من الأجسام ثلاثية الأبعاد متواجدة بالتزامن عند لحظتي المراقبين الحاضرتين، هي حقيقة تتفق تمامًا مع تعريف الحدث.

لا يوجد لدى أنصار البُعْدِيَّة الرباعية أي مشكلة في تفسير نسبية التزامن. فهم ينظرون إلى الخطين الكونيين للساعتين على أنهما جسمان واقعيان رباعيا الأبعاد، مما يفسر بطبيعة الحال لماذا يوجد زوجان مختلفان من الساعات ثلاثية الأبعاد بالنسبة إلى المراقبين A وB عند M. بدلالة لغتنا اليومية ثلاثية الأبعاد، "يقطع" حاضرا المراقبين زوجي "شرائح" مختلفة ثلاثية الأبعاد من خطي كون الساعتين. على الرغم من ذلك، لا يكون خطّا كون الساعتين مقسمًا موضوعيًا إلى "شرائح" ثلاثية الأبعاد، مما يبين أنه، من منظور البُعْدِيَّة الرباعية، يكون مفهوم ساعة ثلاثية الأبعاد هو مجرد وصف وليس لديه أي معنى موضوعي. يؤيد تحليل نسبية التزامن منظور البُعْدِيَّة الرباعية، ولكنه لا يوفر حجة حاسمة ضد التصور المُنَسْبَن للآنيَّة. لقد رأينا،على الرغم من ذلك، أن نسبية التزامن تدفع أنصار الآنيَّة إلى الاعتراف بأن الجسم الفيزيائي يتواجد كجسم مختلف ثلاثي الأبعاد عند كل لحظة مختلفة من زمنه الحقيقي، مما يعني أن الرؤية الآنيَّة للأجسام الفيزيائية (الموضحة في شكل ٥,٢ أ) ينبغي أن تكون مُنَسبَنة لتجنب التناقض مع النسبية.

من الجدير بالذكر أنه عندما نعتبر وجود الساعتين قيد الاعتبار في نسبية التزامن كما هو مبين في شكل ٥,٣، يصبح من الواضح أن هذا التأثير تمت صياغته بدلالة التقسيم قبل النسبوي للأحداث الذي طُبِّق على كل من المراقبين. وبالفعل إذا كان المراقبين A وB في شكل ٥,٣، عند الحدث M، يسألان عند أي لحظة من زمنها الحقيقي تكون كل ساعة من الساعتين موجودة، فإن الإجابة الوحيدة المتسقة مع النسبية تمليها نسبية التزامن: بالنسبة إلى المراقب A، تكون كلتا الساعتين موجودتين عند الثانية الخامسة من زمنهما الحقيقي؛ تكون الساعة C_1 بالنسبة إلى المراقب B موجودة عند الثانية الثامنة من زمنها الحقيقي، بينما تكون الساعة C_2 موجودة عند الثانية الثانية من زمنها الحقيقي. لن يقول المراقب A أن C_1 وC_2 موجودتان (بالنسبة إلى A) عند الثانيتين الثامنة والثانية من زمنيهما الحقيقي، على التوالي، لأن هذين الحدثين ليسا متزامنين مع حدث التلاقي M. وبذلك، عند اعتبار وجود C_1 وC_2، يكون لنسبية التزامن معنى فقط لو طبق كل من الملاحظين التقسيم قبل النسبوي للأحداث إلى ماضي، وحاضر (موجود) ومستقبل. لهذا يكون حضور (وجود) الساعتين البعيدتين بالنسبة إلى المراقبين A وB حاسمًا بالنسبة إليهما لو كان لنسبية التزامن أي معنى – إذا أصر A وB، عندما يتقابلان عند الحدث M، أن M (الحدث "هنا الآن") فقط هو الحاضر، وبالتالي يكون واقعيًا بالنسبة لهما، فلن يكون باستطاعتهما قول أي شيء عن وجود الساعتين البعيدتين C_1 وC_2، ولن يكون باستطاعتهما الإدلاء بأي تصريح عن الموجود بالتزامن بالنسبة لهما عند M. يبين هذا أن شتاين لم يكن على صواب عندما كتب [٣٣، ص ١٦]، [٢٩، ص ١٥٥]: "حقيقة أنه لا توجد خبرة سابقة لحضور الأحداث النائية كانت إحدى نقاط البداية الرئيسية لآينشتين." لكن القول الدقيق هو إن شتاين على صواب، لأن مفهوم الأحداث الحاضرة لا يتوافق فعلاً مع مفهوم الزمكان، ولكن ذلك

اللاتوافق يقتضي ضمناً البُعْدِيَّة الرباعية التي رفضها شتاين. استخدام التقسيم قبل النسبوي للأحداث بواسطة كل من المراقبين الموجودين في حالة حركة نسبية عندما يحددان ما هو متزامن بالنسبة لهما ليس بغريب، لأن النسبية الخاصة، في صياغتها الأصلية عام ١٩٠٥، اعتمدت ضمنيًا على الرؤية الكونية الموجودة التي تقضي بأن الحاضر فقط هو الموجود. وفي صياغة مينكوفسكي للنسبية الخاصة، يكون لنسبية التزامن معنى فقط عندما يصف مراقبان في حالة حركة نسبية الزمكان *الملتحم* بدلالة لغتنا اليومية ثلاثية الأبعاد، وهو أساس الرؤية الآنيَّة.

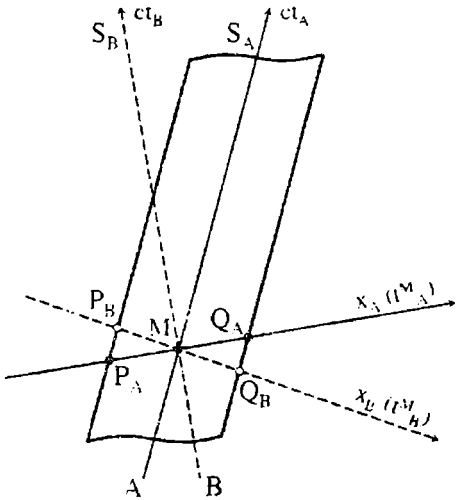
ينشأ تأثيران نسبويان آخران – تقلّص الطول وتمدد الزمن –من نسبية التزامن، أي من حقيقة أنه، مع وجود مجموعات مختلفة من الأحداث المتزامنة، يكون لمراقبين في حالة حركة نسبية أفضية مختلفة ثلاثية الأبعاد (أيْ أزمنة حاضر مختلفة طبقًا للرؤية الآنيَّة). وبما أن نسبية التزامن تقع وراء هذه التأثيرات، فإن تحليلها يوضح أيضًا أن الآنيَّة يمكنها تجنب التناقض المباشر مع النسبية فقط إذا كان وجود الأجسام الفيزيائية مُنَسْبَنًا أنطولوجيًا.

٥-٣ تقلّص الطول

طبقًا لِلُورنتز، أي جسم متحرك ينبغي أن يكون قد تعرض لتقلص في اتجاه حركته [...]. تبدو هذه الفرضية خيالية للغاية، لأن التقلص لم يُنظر إليه على أنه نتيجة لمقاومات في الأثير، أو أي شيء من هذا القبيل، وإنما اعتبر ببساطة منحة من السماء، – أي بمثابة حالة مصاحبة لحالة الحركة.

هـ. منكوفيسكى [١١، ص ٨١]

اعتبر مراقبَين A وB في حالة حركة نسبية، وقضيبًا طوله الحقيقي $l_A = Q_A - P_A$، ساكنًا بالنسبة إلى المراقب A وخطه الكوني موضح بالرسم في شكل ٥,٤. تتطابق نقطة منتصف القضيب مع نقطة أصل إطار الإسناد S_A الذي يكون فيه المراقب A ساكنًا. عندما يلتقي المراقبان عند الحدث M، يقيسان طول القضيب. وكما رأينا في الفصل الرابع، استنتج فريق البحث الجذري أنه، إذا كان الزمكان واقعيًا، يكون أنبوب القضيب الكوني جسمًا واقعيًا رباعي الأبعاد ويقطع فضاءا A وB اللحظيان ثلاثيا الأبعاد أنبوب القضيب الكوني عند مكانين مختلفين. هذا يعني أن المراقبين سوف يحددان أن للقضيب طولين مختلفين في إطاري الإسناد S_A وS_B، وأن طوله الحقيقي l_A المقاس في إطار سكونه S_A هو الأطول. وبالتالي عندما يقيس المراقب B طول القضيب، سوف يجد طولاً أصغر $l_B < l_A$ $(l_B = Q_B - P_B)$.



شكل ٥,٤ قضيب طوله الحقيقي l_A ساكن في إطار مراقب A مُمثَّل بأنبوبه الكوني. طول القضيب بالنسبة إلى B، الذي يتحرك بالنسبة إلى A، متقلص نسبويًا.

نعلم الآن أن النسبية الخاصة تتنبأ التأثير نفسه، والسؤال الطبيعي هو: هل التفسير الزمكاني لتقلّص الطول الذي قدمه فريق البحث الجذري هو التفسير المحتمل الوحيد؟ في مطلع القرن العشرين، كانت هناك محاولات لتفسيره بدلالة القوى المؤثرة بين ذرات الجسم المتقلص(*). لكن أي محاولة لتفسير تقلّص الطول بدلالة إجهاد ينشأ في الجسم المتقلص نسبويًا تواجه ثلاث مشاكل لا يمكن تخطيها:

• تفسير تقلّص الطول بدلالة التشوه يقتضي ضمناً أن يكون الجسم المتقلص نسبويًا هو الجسم ثلاثي الأبعاد نفسه. على الرغم من ذلك، كما رأينا في الفصل الرابع، فإن فرضية أن مراقبَين في حالة حركة نسبية يقيسان الجسم ثلاثي الأبعاد نفسه تتناقض مع نسبية التزامن؛ سوف نعود إلى هذه النقطة بعد قليل.

• إذا تعرض جسم ما إلى إجهاد وتَشَوَّه، يكون تَشَوّهه موضوعيًا؛ بمعنى، أنه متشوه بالنسبة للجميع، وليس بالنسبة لبعض المراقبين بالتحديد. أما في حالة تقلّص الطول، فمن الواضح أن القضيب حسب تعريفه لا يكون مشوهًا بالنسبة للمراقب A؛ ولكنه متقلص فقط بالنسبة للمراقب B. بسبب حقيقة أن هذا التأثير نسبي أو تبادلي، لو أن B لديه نوع القضيب نفسه، فسوف يجد A أن قضيب B قد قَصُرَ وبالتالي شوّه (ولكن بالنسبة إلى B لا يعاني القضيب من أي إجهاد أو تشوه). يوصف تشوه ما للقضيب بواسطة ممتد إجهاد(**). ولكن إذا كان الممتد صفرًا في نظام إحداثيات ما، فإنه يكون

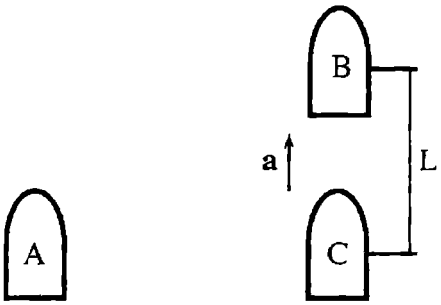
(*) يجب التنويه إلى أن عدم الحصول على نتائج من تجربة مايكلسون – مورلي لا يمكن تفسيره بدلالة تقلص طول الذراع الطولي لمقياس التداخل (على طول حركة الأرض) لأنه طول حقيقي في الإطار الإسنادي للأرض، وبالتالي لا يكون معرضا لتقلص الطول. ثبات مقدار سرعة الضوء هو التفسير الصحيح الوحيد.

(**) ممتد الإجهاد stress tensor هو ممتد من الرتبة الثانية مركباته إجهادات تقع عبر سطوح عمودية على اتجاهات الإحداثيات [المترجم]

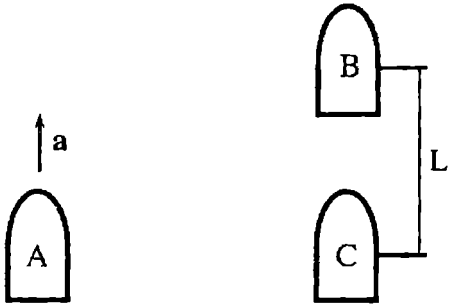
صفرًا في جميع نظم الإحداثيات. وبما أن القضيب ليس مشوهًا بالنسبة إلى A، فإن ممتد الإجهاد في نظام إحداثيات A يكون صفرًا. وبالتالي لا يمكنه أن يختلف عن صفر في نظام إحداثيات B، مما يعني أن القضيب لا يمكن أن يتعرض إلى إجهاد بالنسبة إلى B، وبالتالي لا يمكن أن يُشَوَه.

• الذي يبين تحديدًا أن تفسير الإجهاد لتقلّص الطول خاطئ هو أنه لا يمكنه تفسير تقلص *الفضاء* (حيث لا يوجد ذرات ولا قوى يمكن أن تتسبب في تشوهه). في النسبية الخاصة يتقلص أي شيء في حالة حركة نسبية، بما في ذلك الفضاء(*). مثلاً، لا يمكن تفسير تجربة الميون [٤٢] لو فُرض أن الفضاء لا يتقلص. الميونات عبارة عن جسيمات غير مستقرة تنتج بواسطة الأشعة الكونية في الطبقات العلوية للغلاف الجوي للكرة الأرضية. وبما أن الميونات هي جسيمات قصيرة العمر، فلا ينبغي لها أن تتمكن من الوصول إلى مستوى البحر حتى لو سافرت بمقدار سرعة الضوء. وعلى الرغم من ذلك، يُلاحظ الكثير من الميونات عند مستوى البحر، ويمكن فقط تفسير هذا بواسطة تأثير تمدد الزمن – تكون فترة عمر النصف لها في الإطار الإسنادي للأرض أطول من زمنها الحقيقي؛ لذا تعيش لفترة أطول وتتمكن من الوصول إلى سطح الأرض (مستوى البحر) قبل أن تتحلل. فإنه في إطار إسناد الميون، يصل أيضًا الميون إلى مستوى البحر لأن الحدث المتركز في نقطة (مثلاً، ميون يصل إلى سطح الأرض) هو الحدث نفسه في جميع أطر الإسناد. ويمكن تفسير ذلك في إطار الميون فقط إذا كان الفضاء نفسه يتقلص.

(*) عندما نطبق تحويلات لورنتز لتحديد تقلّص الطول بين نقطتين لا يهم أن تكون هاتان النقطتان نقطتين في الفضاء أو نقطتي نهايتي جسم فيزيائي.



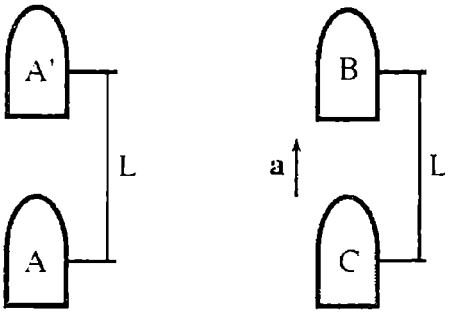
شكل ٥,٥ ثلاث سفن فضاء A، B، وC ساكنة في البداية. عند لحظة معينة في إطار إسناد A، بدأت B وC، المتصلتان بخيط، في التسارع بنفس والتسارع الحقيقي نفسه. على حسب بيل، سوف ينقطع الخيط نتيجة الإجهاد الناتج من تقلّص الطول. يعتمد استنتاجه على فرضية أن الأجسام الفيزيائية تتقلص نسبويًا، بينما لا يحدث ذلك للفضاء.



شكل ٥,٦ ثلاث سفن فضاء A، B، وC ساكنة في البداية. ولكن على خلاف التجربة الفكرية الموضحة بالرسم في شكل ٥,٥، فإن سفينة الفضاء A هي التي تبدأ في التسارع في هذه الحالة. لو انقطع الخيط في شكل ٥,٥، ليس بسبب تسارع B وC، وإنما بسبب الإجهاد الناتج من تقلّص الطول، فإنه قد يستنتج مراقب في A أن هذا الخيط ينبغي له أن ينقطع أيضًا. على الرغم من ذلك، قد يكون هذا لغزًا كبيرًا بالنسبة إلى مراقبين في B وC. وباعتبار نسبية الحركة في تأثير تقلّص الطول يتضح أنه لا يوجد إجهاد متضمن في هذا التأثير، وبالتالي لا ينقطع الخيط في شكل ٥,٥ بسبب تقلّص الطول.

عدم الأخذ في الاعتبار أن كلا من الفضاء والأجسام الفيزيائية تتقلص نسبويًا قد يؤدي إلى التباس. في عام ١٩٥٩ قام أ.م. ديوان و م. بيران [٤٤] (انظر أيضًا [٤٥،٤٦،٤٧،٤٨]) بطرح تجربة فكرية بهدف توضيح وجود الإجهاد في الجسم المتقلص نسبويًا. في السبعينيات، قام ج. بيل بإحياء تلك التجربة الفكرية التي تبدو تناقضية في مناظرة مع الزملاء في سيرن. في هذه التجربة كانت ثلاث سفن فضاء A، B، و C ساكنة في البداية (شكل ٥,٥). ثم بدأت B و C، المتصلتان بخيط هش طوله L، في التسارع برفق بحيث تكون لديهما عند كل لحظة السرعة نفسها بالنسبة إلى سفينة الفضاء A: "[...] وبهذا تظلان متباعدتين عن بعضهما بعضًا بمسافة ثابتة". يزعم بيل أنه، بينما تزداد مقدار سرعة B و C، [٤٩، ص ٦٧] "سوف يصبح الخيط قصيرًا للغاية، وذلك بسبب حاجته لتقلص فيتزجيرالد، وينبغي له في النهاية أن ينقطع. يجب أن ينقطع عندما يفرض المنع المصطنع للتقلص الطبيعي، عند سرعة عالية بدرجة كافية، إجهادًا غير محتمل."

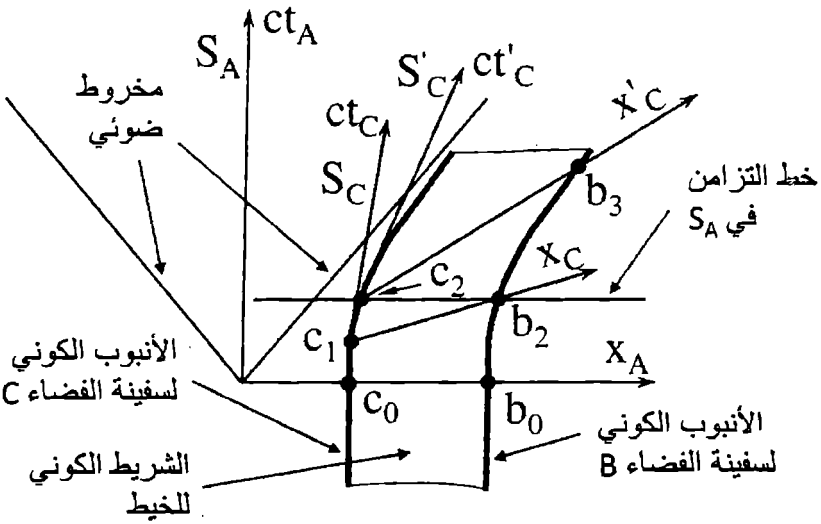
المشكلة الواضحة في تفسير بيل هي فرضه أن الفضاء بين B و C لا يتقلص، بينما الخيط يتقلص. أيضًا، كقاعدة، أولئك المعتقدون بأن تقلّص الطول يشتمل على إجهاد، ينشأ في الجسم المتقلص، لا يحللون *تبادلية* هذا التأثير ونسبية الحركة بدرجة كافية. لو أن بيل قد اعتبر أن سفينة الفضاء A هي التي زادت من سرعتها ببطء بينما لم تغير B و C من حالة حركتهما (شكل ٥,٦)، لأدرك أنه لو انقطع الخيط أثناء تسارع B و C برفق، فقد يجد مراقب في A أن الخيط ينبغي له أن ينقطع أيضًا عندما تتسارع A. (ينبغي التنويه إلى أن القاعدة الوحيدة للتسارع في حجة بيل هي لضمان زيادة مستمرة لتقلّص الطول [٤٩، ص ٧٨، ملحوظة ٣]). ولكن ذلك الانقطاع قد يكون معجزة بالنسبة إلى B و C لأن حالة حركتهما لم تكن قد تغيرت. لذلك فإن أخذ نسبية الحركة في الاعتبار يوضح أن الخيط لا يمكن أن ينقطع نتيجة تقلص الطول، وبالتالي فإن التجربة الفكرية للسفن الفضائية الثلاث لا يمكن تفسيرها بدلالة تقلّص الطول.



شكل ٥,٧ سفينة فضاء أخرى A' أضيفت للتجربة الفكرية الموضحة بالرسم في شكل ٥,٥. سفينتا الفضاء A و A' متصلتان هما أيضًا بخيط. لو انقطع الخيط في شكل ٥,٥، ليس بسبب تسارع B و C، وإنما بسبب الإجهاد الناتج عن تقلّص الطول، لاستنتج المراقبان في B و C أن الخيط الواصل بين A و A' ينبغي له أن ينقطع أيضًا. على الرغم من ذلك، قد يكون هذا لغزًا كبيرًا بالنسبة إلى مراقبين في A و A'. إذا أخذت تبادلية تقلّص الطول في الاعتبار يتضح أنه لا علاقة للإجهاد بهذا التأثير، وبالتالي فإن الخيط في شكل ٥,٥ لا ينقطع بسبب تقلّص الطول.

السبب في أن الخيط ينقطع هو الزيادة في المسافة الحقيقية بين B و C المُقاسة بواسطة المراقبين في B و C، وهو تأثير تسارع نسبوي [٥٠،٥١]. ذكر بيل نفسه أن "B، مثلاً، ترى C تنجرف أبعد فأبعد إلى الوراء، بحيث إن قطعة معينة من الخيط لا يمكنها أن تغطي المسافة أكثر من ذلك" [٤٩، ص ٦٨]. توضح الحقيقة الراسخة بأن المسافة الحقيقية تزيد أن ذلك الخيط ينقطع، ولكن ليس بسبب تقلّص الطول. يتطلب تقلّص الطول النسبوي أن المسافة الحقيقية ينبغي أن تظل كما هي، كما يظهر بوضوح في الحالة المبينة في شكل ٥,٦، عندما تتسارع A – في تلك الحالة تظل المسافة الحقيقية بين B و C ثابتة ولن ينقطع الخيط لأن كلاً من المسافة بين B و C وطول الخيط سوف يخضع لتقلص الطول الذي حسبه مراقب في A.

بل إنه يمكن زيادة التوضيح أكثر إذا ما أخذت تبادلية تقلّص الطول في الاعتبار. اعتبر سفينة فضاء أخرى A' تكون ساكنة بالنسبة إلى A والاثنتان متصلتان بخيط له الطول نفسه L متوازٍ مع الخيط الواصل بين B و C (شكل ٥,٧). بينما تتسارع B و C، سوف تجدان أن المسافة بين A و A' تصبح أقصر فأقصر، بينما تظل المسافة الحقيقية بين A و A' المقاسة بواسطة مراقبين في A و A' ثابتة. من الواضح أن الخيط الواصل بينهما لن ينقطع لأن كلا من المسافة L والخيط يتقلص نسبويًا، وذلك كما كما لوحظ من B و C. يدل هذا بوضوح على أنه لا يوجد إجهاد في الخيط المتقلص نسبويًا (قد يتواجد إجهاد لو أن الخيط قد تقلص والفضاء لم يتقلص).



شكل ٥,٨ سفينتا الفضاء B و C ممثلتان بأنبوبهما الكونيين. الخيط الواصل بين B و C مُمَثَّل بشريطه الكوني. إطارا الإسناد القصوريان S_t و S'_t المتلازمان لحظيًا في الحركة والمناظران للحدثين c_1 و c_2، على التوالي، يُستخدمان لتحديد المسافة الحقيقية المتزايدة بين B و C

التفسير النسبوي السليم الوحيد للمسافة الثابتة بين B و C، كما حسبه مراقب في A، هو أن المسافة الحقيقية بين B و C، المقاسة بواسطة أحدهما، تزيد. وينبغي أن تزيد بالنسبة إلى B و C تمامًا بقدر ما تقل بالنسبة إلى A نتيجة تقلّص الطول لكي تبقى المسافة L ثابتة بالنسبة لمراقب في A. أكدت الحسابات هذا [٥٢]، ولكن تظل مسألة *المعنى الفيزيائي* لزيادة المسافة الحقيقية كما قاستها B أو C غير واضحة لو فُرض أن سفن الفضاء موجودة كأجسام ثلاثية الأبعاد – بما أن B و C تتسارعان التسارع نفسه الحقيقي، يكون السؤال هو: لماذا تزيد المسافة الحقيقية بينهما؟ إجابة هذا السؤال الوحيدة التي لها معنى هي أن أنبوبي الكون لسفينتي الفضاء B و C هما جسمان رباعيا الأبعاد، وفضاء B و C اللحظي، المناظر للحظات متعاقبة من زمنهما الإحداثي، يقطع أنبوبي الكون عند زاوية متغيرة بانتظام، مما ينتج عنه مسافة حقيقية بين B و C في زيادة دائمة. لرؤية هذا اعتبر رسم الزمكان التوضيحي في شكل ٥,٨، حيث تمثل سفينتا الفضاء Bو C بواسطة أنبوبهما الكونيين، والخيط، الواصل بينهما، مُمَثّل بواسطة شريطه الكوني. تبدأ B و C في التسارع بالتزامن (الحدثان b_0 وc_0) في إطار الإسناد القصوري S_A الذي تكون فيه سفينة الفضاء A ساكنة. عند هذه اللحظة تكون المسافة بين B و C كما تحددت في S_A هي $L = x_{b_0} - x_{c_0}$. طول الخيط يساوي L أيضًا. عند جميع اللحظات التالية في S_A تظل تلك المسافة ثابتة، ولكن الخيط يتقلص نسبويًا وينقطع. سوف يستغرب مراقب في S_A من حقيقة أن المسافة L بين B و C لا تتعرض إلى تقلص في الطول، مما أدى إلى انقطاع الخيط.

يمكن أن يكون التفسير الوحيد هو أنه، بينما تزيد سرعة B و C، تزيد المسافة الحقيقية الفاصلة بينهما، والمقاسة بواسطة أحدهما، بانتظام لكي تعوض بالضبط نقصان المسافة L المنتظم، نتيجة تقلّص الطول، كما قيست في S_A. عند الحدث c_1، يقرر مراقب في سفينة الفضاء المتسارعة C أن يحدد

ما هي المسافة الحقيقية بين B و C. يمكن فعل ذلك عن طريق الأخذ في الاعتبار حقيقة أن فضاء مراقب متسارع عند لحظة معينة من زمنه هو في الحقيقة فضاء إطار الإسناد القصوري الملازم لحظيًا لحركته المناظر لتلك اللحظة. ذلك الإطار عند الحدث c_1 هو S_C. في الإطار القصوري هذا، وبالنسبة إلى مراقب في C عند الحدث c_1، تكون المسافة الحقيقية بين B و C هي $x_{b_2} - x_{c_1}$، وتكون أكبر من المسافة الثابتة L المقاسة في S_A. الإطار القصوري الملازم للحركة عند الحدث اللاحق c_2 هو S'_C، والمسافة الحقيقية المعينة هناك وبواسطة مراقب في C عند c_2 هي $x_{b_2} - x_{c_2}$، والتي تكون أكبر من المسافة الحقيقية $x_{b_2} - x_{c_1}$ المعينة عند الحدث c_1. إذا تزيد بالفعل المسافة الحقيقية مع زيادة سرعة B و C بالنسبة إلى S_A – تكون سرعة الإطار القصوري S'_C الملازم للحركة عند c_2 أكبر من سرعة الإطار القصوري S_C الملازم للحركة عند الحدث السابق c_1.

الأنبوبان الكونيان لسفينتي الفضاء B و C ليسا مجرد تمثيل بياني وإنما ينبغي أن يكونا جسمين واقعيين رباعيي الأبعاد، ويمكن فهم ذلك بصورة أوضح من السؤال البسيط: عند أي لحظة من تاريخهما تتواجد B و C؟ بالنسبة، مثلاً، إلى مراقب في C (وفي S'_C) عند الحدث c_2 تتواجد سفينتا الفضاء المتسارعتان B و C عند الحدثين b_2 وc_2، على التوالي. لكن بالنسبة لمراقب في A (في S_A) تتواجد B و C عند الحدثين b_2 وc_2، على التوالي (لأن هذين الحدثين متزامنان في S_A). لكي تتواجد B عند حدثين مختلفين بالنسبة للمراقبين في S_A و S'_C، ينبغي أن يكون أنبوب B الكوني جسمًا واقعيًا رباعي الأبعاد. الحجة نفسها ، ينبغي أن يكون أنبوب C الكوني واقعيًا أيضًا. صحيح أن هذا الاستنتاج يعتمد على فرضية الوجود المطلق، ولكن لكي نكمل تفسير المفارقة الظاهرة لسفن الفضاء المتسارعة هنا، سوف نقوم باستخدام هذه الفرضية، لأن الفرضية المقابلة – وهي أن الوجود نسبي – تناقض الدليل التجريبي النسبوي، كما سنرى.

بالأخذ في الاعتبار واقعية أنبوبي B و C الكونيين وواقعية الشريط الكوني للخيط يتوفر تفسير مكتمل للزيادة الرتيبة للمسافة الحقيقية بين B و C وذلك كما قيست بواسطة أيهما – أفضية أطر الإسناد القصورية الملازمة لحظيا للحركة التي تناظر الأحداث المتعاقبة لأنبوب C الكوني تقطع خطي B و C الكونيين الموجودين بزاويتين مختلفتين كما هو مبين في شكل ٥,٨. يبدو من الوهلة الأولى أن حقيقة الزيادة الرتيبة للمسافة الحقيقية بين B و C، مع استمرار سفينتي الفضاء في التسارع، تفسر سبب انقطاع الخيط. ولكن ليس هذا هو الحال تمامًا. نتيجة اصطلاحية التزامن (كما سنرى في قسم ٦,١)، لنا الحرية في اختيار ما إذا كان الفضاء لإطار إسناد قصوري ما متعامدًا مع محوره الزمني أم لا. هذا يعني أن الأطوال الحقيقية المتزايدة، المعرفة على أنها تقاطعات أفضية الأطر القصورية الملازمة لحظيًا للحركة مع أنبوبي B و C الكونيين، ليس لها معنى موضوعي. كما صاغها س. لايلي [٥١]:

في زمكان مينكوفسكي، لا يبقي جسمان يخضعان لنفس التسارع الحقيقي نفسه على نفس المسافة الحقيقية نفسها بينهما كما قيست في الإطار القصوري الملازم لحظيًا لحركة أحد الجسيمات. الفكرة هي أن المسافة الحقيقية هي مفهوم نسبي، اعتمادًا على اختيار الأسطح الفوقية شبه الفضائية في النظام الإحداثي.

إذا كانت المسافة الحقيقية بين B و C تعتمد على اختيارنا، كيف تكون الزيادة في شيء ما لا يعكس أي شيء موضوعي سببًا في الانقطاع الفيزيائي للخيط؟ يبدو لي أن التفسير الوحيد المتبقي هو ما يلي. قبل بداية تسارع B و C، يكون أنبوباهما الكونيان متوازيين كما يظهر في شكل ٥,٨ وتكون الشريحة الكونية للخيط المشتبك بهما غير مشدودة ولا تخضع لأي إجهاد. ولكن بداية من الحدثين h_0 و c_0، يكون الأنبوبان الكونيان مشوهين، مما يعني

أن الشريحة الكونية للخيط مشدودة بواسطة تشوه أنبوبي B و C الكونيين، وفي النهاية تكون مقطوعة – ببساطة، عند مسافة ما شبه زمنية من الحدثين b_0 و c_0 يكون الشريط الكوني للخيط مقطوعًا.

وكما أوحى لنا بالفعل الحل النسبوي الحقيقي لمفارقة سفن الفضاء الثلاث المتسارعة، فإن التفسير الحقيقي لتأثير تقلّص الطول هو أن فضائَي A وB ثلاثيي الأبعاد، كما يظهر في شكل ٥,٤، يقطعان أنبوب القضيب الكوني بزاويتين مختلفتين [١١]، [٤٣، ص ٧٠] – "يقطع" فضاء A ثلاثي الأبعاد أنبوب القضيب الكوني في المقطع العرضي ثلاثي الأبعاد P_AQ_A، بينما يقطع فضاء B ثلاثي الأبعاد أنبوب القضيب الكوني في المقطع العرضي ثلاثي الأبعاد P_BQ_B، ونتيجة لاختلاف زاويتي المقطعين العرضيين يكون $l_B < l_A$.

ينظر كثيرون إلى رسم الزمكان التوضيحي في شكل ٥,٤ على أنه ليس أكثر من مجرد تمثيل بياني لا ينبغي أخذه على محمل الجد. دعنا نرى ما إذا كان هذا هو الحال فعلاً. أول شيء مؤكد على الفور هو أن هذا التأثير يكون له معنى فقط إذا كان ما قاسه كل مراقب هو جسم ثلاثي الأبعاد – القضيب يكون طبقًا للتعريف جسمًا ثلاثي الأبعاد طوله الحقيقي l_A. كما يظهر في شكل ٥,٢ أ، يتواجد أي جسم ثلاثي الأبعاد فقط عند لحظته 'الآن'؛ أي جسم موجود في نفس الوقت نفسه عند لحظات أكثر من تاريخه هو جسم رباعي الأبعاد كما يظهر في شكل ٥,٢ ب. إذا كان الجسم ثلاثي الأبعاد ممتدًا مثل القضيب، عندئذ ينبغي أن تتواجد جميع أجزائه *بالتزامن* عند لحظة 'الآن' لمراقب ما. وبذلك، يُعرَّف جسم ما ثلاثي الأبعاد ممتد مكانيًا بواسطة مراقب ما بدلالة التقسيم قبل النسبوي للأحداث – جميع أجزاء القضيب تتواجد بالتزامن عند اللحظة الراهنة للمراقب، مما يعني أنها تشكل مجموعة من الأحداث الراهنة (القضيب الموجود عند لحظة المراقب 'الآن'). وبما أن

المراقبين A وB لهما مجموعتان مختلفتان من الأحداث المتزامنة، فينتج من ذلك أن لهما جسمين مختلفين ثلاثي الأبعاد كالقضيب الخاص بهما، الذي يكون طبقًا للتعريف جسمًا واحدًا. تختفي هذه المفارقة لو أن ما هو موضح في شكل ٥,٤ يمثّل الموقف الحقيقي – بأن القضيب هو بالفعل جسم واحد رباعي الأبعاد، مُمَثَّل بأنبوب القضيب الكوني، ويقطعه فضاءا A وB ثلاثيا الأبعاد في مقطعين عرضيين مختلفين ثلاثيي الأبعاد.

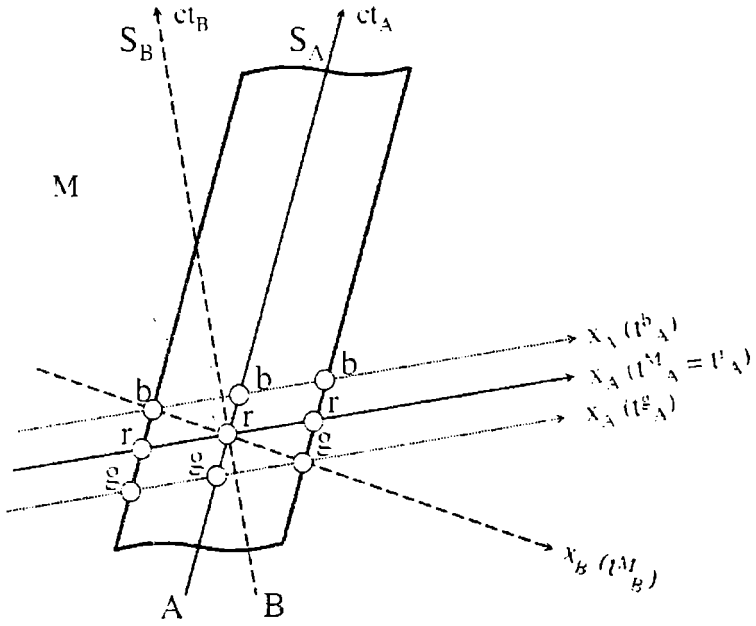
يجب التأكيد على أنه بما أن الجسم ثلاثي الأبعاد الممتد مكانيًا يُعرَّف بأنه "جميع أجزائه الموجودة بالتزامن عند لحظة معينة من الزمن"، فإن تقلّص الطول يعتبر تأكيدًا نوعيًا لنسبية التزامن. ومن ثم فإنها لحقيقة نسبوية فعلاً أنه، أثناء قياس القضيب نفسه، يقيس مراقبان في حالة حركة نسبية قضيبين مختلفين ثلاثيي الأبعاد (مجموعتين مختلفتين من أجزاء القضيب الموجودة بالتزامن) لأن المراقبين لديهما مجموعتان مختلفتان من الأحداث المتزامنة.

لكي نوضح بطريقة أفضل لماذا يكون لدى A وB قضيبان مختلفان ثلاثيا الأبعاد عند أي لحظة من زمنهما، بينما يكونان في حالة حركة نسبية، اعتبر التجربة الفكرية التالية. كما في شكل ٥,٤، لدينا قضيب ساكن في إطار إسناد S_A (شكل ٥,٩). عندما يتقابل المراقبان A وB عند الحدث M، يعينان طول القضيب في إطاري الإسناد الخاصين بهما. يحدث اللقاء عند اللحظة t_A^M من زمن A وعند t_B^M من زمن B. هناك مصابيح ملتحمة عند نقطتي نهاية القضيب ومنتصفه. يتغير لون المصابيح في كل لحظة بالتزامن في S_A: عند اللحظة t_A^g تكون المصابيح الثلاثة جميعها خضراء، عند $t_A^M = t_A^r$ تكون المصابيح حمراء، وعند t_A^b تكون زرقاء.

عند لحظة اللقاء تكون جميع مصابيح القضيب حمـــراء، وذلـــك كمـــا تحددت في S_1. وبهذا فإن ما يكون موجودًا عند تلك اللحظة، بالنسبة إلى A. هو القضيب الأحمر – تكون المصابيح الثلاثة الحمراء متزامنة بالنسبة إلـــى A عند لحظته الراهنة $t'_A = t''_A$. لقد وجد المصباح الأخضر بالنسبة إلـــى A للحظة واحدة *قبل* اللقاء كانت في ماضيه بينما ســـيتواجد المـــصباح الأزرق للحظة واحدة بعد اللقاء تكون في مستقبله. القضيبان الأخضر والأحمر غيـــر موجودين بالنسبة إلى A عند $t'_A = t''_A$، إذا ما أصر المرء على أن الأجـــسام الحاضرة هي فقط الموجودة.

وبما أن المراقب B لديه فئة مختلفة من الأحداث المتزامنة، فلن تكـــون جميع مصابيح القضيب حمراء بالنسبة إلى B عند لحظة اللقـــاء t''_B. ســـوف يجد أن نقطة الطرف الأمامي، ونقطة المنتصف، ونقطة الطـــرف الخلفـــي للقضيب ستكون خضراء، وحمراء، وصفراء، على التوالي. (يتحرك S_B إلى اليسار في شكل ٥,٩.)، هذا يعني أن القضيب أخضر–أحمـــر–أزرق، الـــذي يكون حاضرًا بالنسبة إلى B، يتكون من جزء من القضيب الذي وجـــد فـــي ماضي A (نقطة الطرف الأمامي بالمصباح الأخضر)، والجزء الأوسط مـــن القضيب (الذي يكون حاضرًا أيضًا، وبالتالي يتواجد بالنسبة إلى A عند لحظة اللقاء)، والجزء من القضيب الذي سيكون موجودًا فـــي مـــستقبل A (نقطـــة الطرف الخلفي بالمصباح الأزرق). وبما أن جميع أجزاء أي جـــسم ثلاثـــي الأبعاد تكون موجودة بالتزامن عند اللحظة الراهنة لمراقب ما، فإن القـــضيب ثلاثي الأبعاد الذي يتواجد بالنسبة إلى B عند هذه اللحظة الراهنة t''_B يكـــون مختلفًا عن قضيب A ثلاثي الأبعاد الذي يكون موجودًا عنـــد هـــذه اللحظـــة

الراهنة $t'_A = t'^M_A$. (إن حدث اللقاء M في شكل ٥,٤ هو الحدث الراهن المشترك الوحيد بالنسبة لكلا المراقبين.) يتكون قضيب كل مراقب من خليط من أجزاء من قضبان الماضي، والحاضر، والمستقبل للمراقب الآخر. وبذلك، فإن استنتاج أن كلاً من المراقبين A وB يقيس قضيبًا مختلفًا ثلاثي الأبعاد يكون حتميًا.



شكل ٥.٩ قضيب ساكن في S_A به مصابيح ملتحمة عند نقطتي طرفيه ونقطة منتصفه. يتقابل المراقبان A وB، اللذان يكونان في حالة حركة نسبية، عند الحدث M. في S_A كانت جميع مصابيح القضيب خضراء عند لحظة قبل اللقاء مع B؛ وتكون جميعها حمراء عند لحظة اللقاء. ويتغير لونها بالتزامن في S_A إلى الأزرق لحظة ما بعد اللقاء.

يظهر التحليل الحالي أن ما هو موضح في شكلي ٥,٤ و٥,٩ ليس مجرد بناء نظري مريح يمثل تأثير تقلّص الطول. الوجود المؤكد لهذا التأثير يوضح أن القضيب ينبغي أن يكون جسمًا رباعي الأبعاد لكي يكون لمراقبين في حالة حركة نسبية قضيبان مختلفان ثلاثيا الأبعاد يكونان مقطعين عرضيين من أنبوب القضيب الكوني.

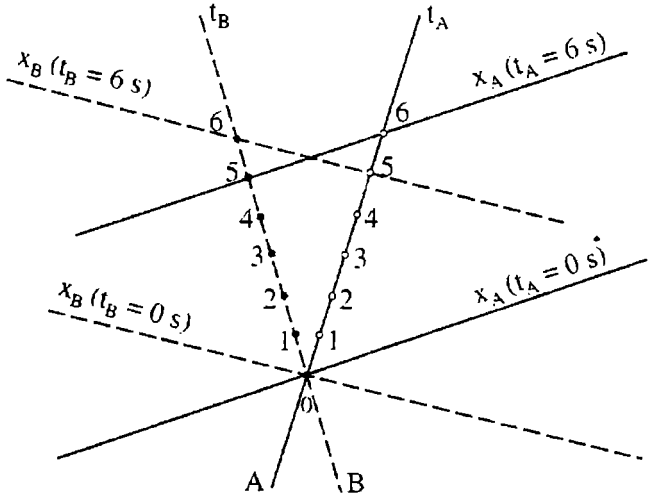
لو أن أنصار الآنيّة ينظرون إلى الوجود على أنه مطلق، فإنهم لا يستطيعون تفسير هذا التأثير النسبوي. ولو كان القضيب موجودًا كجسم فردي ثلاثي الأبعاد كما تقضي الرؤية الآنيّة (وكما توحي لنا خبرتنا اليومية)، لكان هذا الجسم ثلاثي الأبعاد مشتركًا بين كل من A وB، مما يعني أنه قد يكون لدى A وB فئة مشتركة من الأحداث المتزامنة (جميع أجزاء الأجسام ثلاثية الأبعاد الموجودة بالتزامن عند لحظة معينة من الزمن) في حالة تناقض مع النسبية. الخيار الوحيد للرؤية الآنيّة هو النظر إلى وجود القضيب ثلاثي الأبعاد على أنه منسبن أنطولوجيًا – قضيب واحد ثلاثي الأبعاد موجود بالنسبة إلى A وآخر بالنسبة إلى B، ولكن يعترف كل من A وB فقط بوجود قضيبه ثلاثي الأبعاد.

٥,٤ تمدد الزمن

يمكن للآنية أن تتجنب التناقض المباشر مع تأثير تمدد الزمن والدليل التجريبي المؤيد له عن طريق الافتراض مرة أخرى بأن وجود الساعات التي يشملها هذا التأثير منسبن أنطولوجيًا. اعتبر ساعتين A وB في حالة حركة نسبية، خطّاهما الكونيان موضحان في شكل ٥,١٠. يتطابق محورا الزمن لإطاري الإسناد القصوريين S_A وS_B اللذين تكون فيهما الساعتان ساكنتين مع خطي الساعتين الكونيين. يوضح شكل ٥,١٠ فضاءين لحظيين ثلاثيي الأبعاد يناظران لحظتين من زمن كل إطار؛ الفضاءان ثلاثيا الأبعاد ممثلان في الشكل بواسطة محوريهما السينيين فقط. الخطوط المقطّعة تمثل الخط الكوني والفضاءين اللحظيين ثلاثيي الأبعاد للساعة B.

دع الساعتين تقيسان عمليتين متماثلتين تحدثان في الإطـــارين S_A وS_B. كل عملية تستغرق ٥ ثوانٍ كما قيست في إطار سكونها. عند لحظـــة تلاقـــي الساعتين، قام مراقبان في S_A وS_B بضبطهما على الصفر وتشغيل العمليتين. دعنا الآن نرى كم هي الفترة الزمنية التي سوف تـــستغرقها العمليتـــان كمـــا قيست بواسطة مراقبي A و B.

وبما أن الساعتين A و B تقيسان الزمنين الحقيقيين في S_A و S_B، على التوالي، فإن مراقب A سوف يجد أن عملية A تـــستغرق ٥ ثـــوان فـــي S_A ومراقب B سوف يجد أيضًا أن عملية B سوف تستغرق ٥ ثوان لتتم في S_B. ينتج هذا من مبدأ النسبية – قوانين الفيزياء تظل صالحة كما هي في جميـــع أطر الإسناد القصورية. بمعنى آخر، "ينساب" الزمنان الحقيقيـــان للمـــراقبين الطريقة نفسها تمامًا – ثانية واحدة من الساعة A مُقاسة في S_A تساوي ثانية واحدة من الساعة B مُعيّنة في S_B. في شكل ٥,١٠، تنعكس هذه الحقيقة من المسافة الواحدة بين علامتي ثـــانيتين متتـــاليتين علـــى الخطـــين الكـــونيين للساعتين. لهذا *يمكن أن يُنظر لخط الساعة الكوني على أنه مسطرة زمنية.*



شكل ٥,١٠ تمدد الزمن التبادلي

والآن يحاول كل من المراقبين تحديد الفترة الزمنية للعملية التي تحدث في الإطار الآخر. لقياس نهاية عملية B، ينبغي على مراقب A تعيين أي الثواني على شاشة الساعة A تكون متزامنة مع نهاية عملية B، أيْ مع الثانية الخامسة على شاشة الساعة B. كما يتضح من شكل ٥,١٠، تقع الثانية الخامسة للساعة B في الفضاء اللحظي ثلاثي الأبعاد $x_A(t_A = 6s)$ المناظر للثانية السادسة من الزمن الحقيقي لمراقب A. وبما أن الثانية الخامسة من الساعة B (الدالة على نهاية عملية B في S_B) تكون متزامنة مع الثانية السادسة من الساعة A، فإن مراقب A يستنتج أن الفترة الزمنية لعملية B كما قيست في S_A هي ٦ ثوان. هذا ما يسمى بتأثير تمدد الزمن. إنه تأثير نسبوي (تبادلي) كما يظهر في شكل ٥,١٠ – يجد مراقب B أن عملية A تستغرق ٦ ثوان، لأن الثانية الخامسة من الساعة A (نهاية عملية A في S_A) تقع في الفضاء اللحظي ثلاثي الأبعاد $x_B(t_B = 6s)$ لمراقب B المناظر للثانية السادسة من زمنه الحقيقي.

يبدو تأثير تمدد الزمن واضحًا جدًا في الرسم التوضيحي للزمكان في شكل ٥,١٠. ولكن ذلك الوضوح خادع للغاية. والسؤال الأكثر أهمية الذي ينبغي طرحه هنا يكون حول وجود وبُعْدِيَّة الساعتين – عما إذا كانتا موجودتين كجسمين ثلاثيي الأبعاد باقيين خلال الزمن أو كجسمين رباعيي الأبعاد يحتويان التاريخ الزمني الكامل للساعتين العاديتين (الثلاثيتي الأبعاد)، وممثلتين بالخطين الكونيين A وB للساعتين في شكل ٥,١٠. لو أن الخطين الكونيين للساعتين يمثلان ساعتين واقعيتين رباعيتي الأبعاد، فإن تمدد الزمن يكون واضحا بالفعل. وبما أن الساعتين في حالة حركة نسبية، فإن خطيهما

الكونيين ليسا متوازيين وفضائيهما ثلاثيي الأبعاد ليسا متطابقين – بل يصنعان زاوية ما. نتيجة لذلك، "يقطع" الفضاءان اللحظيان ثلاثيا الأبعاد $x_4(t_4 = 0s)$ و $x_4(t_4 = 6s)$ المناظران للثانيتين الصفرية والسادسة لزمن المراقب A الحقيقي طولين مختلفين من خطي الساعتين الكونيين – ٦ ثوان من من الأنبوب الكوني لساعة A و٥ ثوان من من الأنبوب الكوني لساعة B.

على الرغم من ذلك، لو أننا مقتنعون (على أساس خبرتنا اليومية) بأن الساعتين جسمان ثلاثيا الأبعاد يتطوران مع الزمن، عندئذ تبدأ الأسئلة الصعبة. أول شيء يصبح مؤكدًا على الفور هو ما أسميناه بالفعل في حالة نسبية التزامن – أي أن وجود أي جسم ثلاثي الأبعاد لا يمكن أن يكون مطلقًا. اعتبر تأثير تمدد الزمن المُعين بواسطة مراقب A. في S_4 تكون الساعة A التي تُقرأ على شاشتها الثانية السادسة متزامنة مع الساعة B التي تبين شاشتها الثانية الخامسة. حتى الآن في مناقشات تأثير تمدد الزمن، لم يُعطَ اهتمام كاف لحقيقة أنه ينبغي على مراقب A أن يفترض صراحة أن ما هو واقعي بالنسبة له عند الثانية السادسة من زمنه الحقيقي يكون أي شيء موجود عند تلك اللحظة، وهو حاضره الممتد بفضائه اللحظي ثلاثي الأبعاد $x_4(t_4 = 6s)$ في شكل ٥,١٠. ذلك الافتراض ضروري لمراقب A لكي يستنتج أن عملية B تستغرق ٦ ثوان في S_4 – تصل الساعة B بثانيتها الخامسة على شاشتها (موضحة نهاية عملية B في S_4) إلى الوجود عند الثانية السادسة من زمن مراقب A الحقيقي. لهذا ينظر مراقب A إلى عملية B على أنها تستغرق ٦ ثوان في S. لو أن الوجود مطلق، لكان ينبغي على كلا المراقبين أن يتفقا على أن الساعة A تواجدت في ثانيتها السادسة، بينما

تواجدت الساعة B في ثانيتها الخامسة. من الواضح أن هذا يناقض النسبية، لأنه لم يكن من الممكن أن يكون تأثير تمدد الزمن تبادليًا لو أن الساعتين تواجدتا بصورة مطلقة. وهنا بالتحديد تكون الآنيّة التقليدية خاطئة بوضوح.

الرؤية الآنيّة بأن الساعتين هما جسمان ثلاثيا الأبعاد يمكن أن تكون محفوظة فقط لو أن وجود الساعتين مُنَسْبَن. إذًا ستكون الساعة A في ثانيتها السادسة والساعة B في ثانيتها الخامسة موجودتين في S_4 عند الثانية السادسة من زمن A الحقيقي، بينما ستكون الساعة A التي تقرأ شاشتها الثانية الخامسة، والساعة B التي تُظهر ثانيتها السادسة واقعيتين في S_B عند الثانية السادسة من زمن B الحقيقي. هنا أيضًا يصبح من المؤكد تواجد زوجين مختلفين من الساعات ثلاثية الأبعاد بالنسبة إلى الملاحظَيْن. اعتبر الساعة A. لكي يكون تمدد الزمن تبادليا، ينبغي أن تتواجد الساعة A كجسمين ثلاثيي الأبعاد – الساعة A التي تقرأ شاشتها الثانية السادسة تكون موجودة بالنسبة لمراقب A، بينما تكون الساعة A عند ثانيتها الخامسة موجودة بالنسبة إلى مراقب B. وبذلك يتحتم تواجد زوجين مختلفين من الساعات ثلاثية الأبعاد بالنسبة إلى ملاحظَيْ A وB. لو أن الملاحظَيْن مناصران للآنيّة ومقتنعان فقط بوجود الأجسام ثلاثية الأبعاد، فسوف يتمسك كل منهما بأن زوج الساعات ثلاثية الأبعاد الخاص به فقط هو الموجود وسوف ينكر وجود زوج الساعات ثلاثية الأبعاد الخاص بالمراقب الآخر. من ناحية أخرى، هذه هي بالضبط نسبنة وجود الأجسام الفيزيائية أنطولوجيًا.

لو أن الوجود منسبن أنطولوجيًا، لَبَدا أن معضلة ثلاثي الأبعاد \ رباعي الأبعاد ستظل في إطار النسبية. بل إنه يبدو للوهلة الأولى أن النسبية

الخاصة قد تساند نسبنة الوجود هذه لأن المرء يميل لاعتقاد ذلك، فبعد إدخال الحركة المُنَسبَنة والتزامن، قد تتطلب النسبية الخاصة نسبنة الوجود أيضًا. لكن فكرة أن أكثر "سمات" الواقع جوهرية – الوجود – ربما تفقد حالتها المطلقة وتصبح معتمدة على المراقب أو الإطار بالمفهوم الأنطولوجي، فتبدو مربكة. وطبقًا لصياغة جوديل [٣٥]: "مفهوم الوجود [...] لا يمكن نسبنته دون القضاء على معناه تمامًا." يمكن تطوير هذا إلى حجة فلسفية قوية، ولكنني أفضل التركيز على الحجج التي توضح أن النسبية الخاصة نفسها ترفض الرؤية التي تنظر إلى الوجود على أنه منسبن أنطولوجيًا.

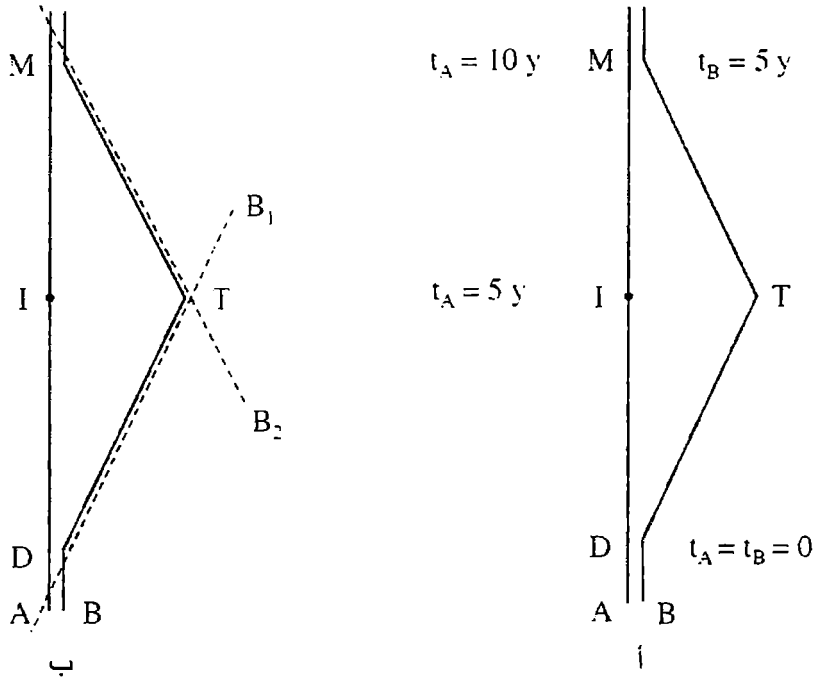
٥,٥ نسبنة الوجود ومفارقة التوأم

لقد رأينا أن نسبية التزامن تجبر أنصار الآنيّة على نسبنة الوجود للحفاظ على رؤية الواقع ككون ثلاثي الأبعاد. لكي نوضح أنه حتى الآنيّة المنسبنة تناقض النسبية، دعنا نعتبر مفارقة التوأم التي تُعتبر تأثيرًا مطلقًا دون أي تدخل من نسبية التزامن.(*) الأنبوبان الكونيان للتوأمين A وB موضحان في شكل ٥,١١. في البداية يكون A وB في حالة سكون بالنسبة لبعضهما – يكون أنبوباهما الكونيان متوازيين قبل الحدث D الذي يغادر عنده التوأم B، وبعد الالتفاف عند الحدث T يقابل A مرة أخرى عند الحدث M. الأنبوب الكوني للتوأم A هو خط مستقيم، مما يعني أنه هو الذي لا يغير حالة حركته.

(*) تستخدم نسبية التزامن عندما يصف كل من التوأمين معدل ساعة التوأم الآخر، ولكن التأثير في حد ذاته مطلق ولا يمكن تفسيره بواسطة نسبية التزامن. كما رأينا في الفصل الرابع، المعادلة التي تربط بين زمني التوأمين تم الحصول عليها بواسطة الاستفادة من لاتغير الفترة.

في الهندسة الإقليدية، يكون الخط المستقيم أقصر مسافة بين نقطتين. لقد رأينا في الفصل الرابع أنه في الهندسة الإقليدية الزائفة لزمكان مينكوفسكي يكون الخط الكوني المستقيم هو الأطول بين الخطوط الكونية الواصلة بين حدثين. وبما أن الزمن الحقيقي لمراقب يقاس على طول أنبوبه الكوني، فإن كلاً من التوأمين يقيس زمنه الحقيقي المنقضي على طول أنبوبه الكوني. الزمن المنقضي بين الحدثين D و M طبقاً للتوأم A يكون أكبر من الزمن كما قاسه التوأم B – يكون أنبوب A الكوني بين الحدثين D و M أطول من أنبوب B الكوني بين نفس الحدثين. (في شكل ٥,١١، يحدث العكس لأن الشكل التوضيحي قد رُسم في الهندسة الإقليدية العادية.)

دعنا نفترض أنه عندما يتقابل A و B عند M، تكون قد مرت خمس سنوات بالنسبة إلى B وعشر سنوات بالنسبة إلى A. يتفق كلا التوأمين على أن زمنا أطول قد انقضى بالنسبة إلى A. وبالتالي فإن فرق الزمن بين ساعتي التوأمين هو تأثير مطلق – وبما أن التوأمين يقارنان مباشرة ساعتيهما عند M، فإنه لا يوجد أي تدخل من نسبية التزامن ولا تكون نسبية الوجود ضرورية لتفسير هذا الفرق. ما يهم بالفعل في هذا التأثير النسبوي المقارنة المباشرة لساعتي A و B عندما يلتقيان عند M؛ تلك المقارنة لا يوجد بها أي تدخل من نسبية التزامن. حقيقة أن نسبية التزامن لا تلعب أي دور في مفارقة التوأم تعني أنه لا يمكن تفسيرها باستخدام تمدد الزمن التبادلي، لأن ذلك يعتمد على نسبية التزامن. من آن لآخر، يميل الفيزيائيون والفلاسفة إلى طرح نعت "تفسيري" لهذا التأثير النسبوي عن طريق القول بأنه قد مضت على التوأمين فترتان زمنيتان مختلفتان لأن الزمن يكون في النسبية معتمداً على الإطار. من الواضح أن هذا "التفسير" لا يفسر أي شيء لأن السؤال الأهم هو: لماذا يكون الزمن في النسبية معتمداً على الإطار؟



شكل ٥,١١ مفارقة التوأم (أ) ونسختها ثلاثية الساعات (ب)

التحليل التالي بهدف توضيح أن مفارقة التوأم تكون ممكنة فقط في كون رباعي الأبعاد، يكون فيه أنبوبا التوأمين الكونيان جسمين واقعيين رباعيي الأبعاد. لرؤية ذلك، دعنا نبدأ من الرؤية المقابلة – بأن أنبوبيهما الكونيين ليسا حقيقيين، وأن التوأمين موجودان كجسمين عاديين ثلاثيي الأبعاد يتطوران مع الانسياب الموضوعي للزمن [٥٤]. في تلك الحالة، ينبغي أن يتواجد كلٌ من A وB عند M – وإلا ما معنى اللقاء إذا لم يكونا كلاهما حاضرين هناك؟ الطريقة الوحيدة لكي يتمكن A وB من تفسير فرق الخمس سنوات الزمني هي افتراض أن زمن B "تباطأ" بصورة ما أثناء رحلته. وبما أن الفرق الوحيد بين حالتي حركة A وB هو التسارع الذي خضع له B أثناء

رحلته، فإنه يترتب على ذلك أن يكون هو المسؤل عن الفارق الزمني. إنه التسارع أيضًا الذي أظهر اللاتماثل بين التوأمين ووضح أن مفارقة التوأم ليست مفارقة، ولكنها تأثير واقعي. من ناحية أخرى، لا يتأثر معدل ساعة نموذجية بتسارعها، وذلك طبقًا لما يسمى 'فرضية الساعة' والتجارب التي تؤكدها (انظر، على سبيل المثال، [٥٥، ص ٨٣]) [٥٦، ص ١٦٤]، [٥٧، ص ٣٣]، ٥٨، ص ٥٥].

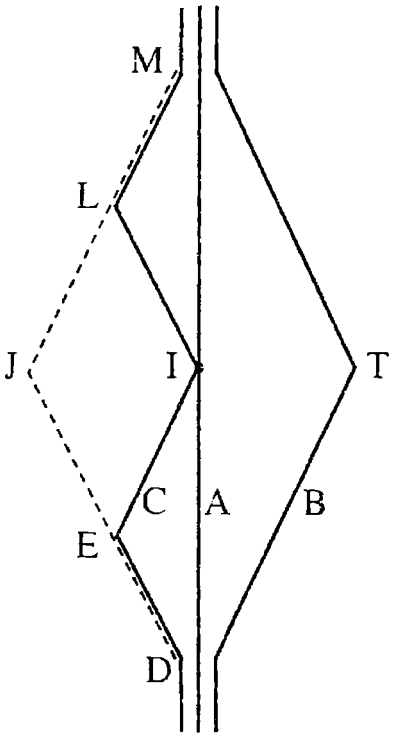
هناك حجة أخرى تقضي بأن التسارع لا يسبب تباطؤ زمن B، وهي ما تسمى النسخة ثلاثية الساعات لمفارقة التوأم المبينة في شكل ٥,١١ ب (انظر، على سبيل المثال [٥٩]). بدلاً من التوأم B، الذي يتسارع أربعة أضعاف أثناء رحلته، اعتبر ساعتين B_1 وB_2 تتحركان بسرعتين ثابتتين. عند الحدث D تكون قراءة كل من الساعة B_1 وساعة A مضبوطة على صفر (عندما تمر B_1 على A). عندما تصل B_1 إلى نقطة الالتفاف عند T، تعترض طريقها الساعة الثانية B_2 وتكون قراءتا الساعتين متواقتة لحظيًا. تُقارن قراءتا الساعتين B_2 وA عند M في اللحظة التي تمر فيها B_2 على A. تُظهر الحسابات أن الفرق في قراءتي B_2 وساعة A عند M سوف يكون خمس سنوات مرة أخرى. وحيث إن التسارع لا يسبب تباطؤ زمن B، وبما أنه لا يوجد أي فرضية أخرى تم اقتراحها من قبل لهذا التباطؤ، فإنه يبدو من المؤكد تقديريًا أن انسياب زمن B لا يتأثر بأي شكل من الأشكال.

وكحجة ثالثة تقضي بأن التسارع لا يتسبب في تباطؤ زمن B، اعتبر توأمًا إضافيًا، ثالثًا، C يتسارع ضعف عدد مرات التوأم B. الأنابيب الكونية للتوائم الثلاثة موضحة بالرسم في شكل ٥,١٢. يغادر التوأمان B وC في اتجاهين متعاكسين عند الحدث D. يسافر التوأم B لمسافة IT، ويلتف للخلف عند الحدث T، ثم يصل عائدًا إلى موقع A عند الحدث M. يسافر التوأم C

نصف المسافة التي قطعها B، ويلتف للخلف عند الحدث E، ويلتقي بالتوأم A عند الحدث I، يغادر مرة أخرى، وبعد أن يلتف للخلف عند الحدث L، يعود إلى التوأم A عند M. تُظهر الحسابات أن الفرق في قراءة ساعتي A وB عند M سيكون خمس سنوات مرة أخرى، كما في حالة النسخة ثلاثية الساعات من مفارقة التوأم.

الحجج الثلاث المذكورة أعلاه تستبعد التسارع كسبب محتمل للفرق في زمني التوأمين، ولكن مازال يمكن التكهن بأنه قد يوجد سبب ما لتباطؤ زمن التوأم B. والقول بأن زمني A وB ينسابان الطريقة نفسها تمامًا ينتج بدقة من حقيقة أن ساعتي A وB تقيسان الزمنين الحقيقيين. ولقد تم التغاضي، على حد علمي، عن حقيقة أنه، عند الحدث M، يقارن التوأمان زمنيهما الحقيقيين، اللذين لا يكونان، طبقًا لمبدأ النسبية، معرضين لأي تمدد. كما رأينا في شكل ٥,١٠، تستغرق عملية A وعملية B كمية الزمنين الحقيقيين نفسها للمراقبين A وB، على التوالي. الزمن المتمدد هو الفترة الزمنية لعملية B كما قاسها المراقب A وبالعكس.

وبما أن الأزمنة الحقيقية لا تكون متمددة نسبويًا، فإنه يتحتم على الزمنين الحقيقيين لمراقبين في حالة حركة نسبية (موجودين عند لحظتي حاضرهما كجسمين ثلاثيي الأبعاد طبقًا للرؤية الآنيّة) أن ينسابا بالتساوي. هذا يعني أنه إذا كان التوأمان جسمين ثلاثيي الأبعاد، فلن يكون هناك أي فارق زمني عندما يقارن A وB مباشرة زمنيهما الحقيقيين عند M. وبالتالي فإن تأثير مفارقة التوأم، إذا ما صيغ بدلالة الرؤية الآنيّة، قد يكون مستحيلاً. يبين هذا عدم صحة فرضنا الابتدائي – بأن A وB موجودان فقط كجسمين ثلاثيي الأبعاد معرضين لانسياب موضوعي للزمن كما يتطلبه التصور المنسبن للآنيّة. حقيقة أن تأثير مفارقة التوأم والتجارب التي تؤكده لم يكن ممكنًا إذا كان التوأمان جسمين ثلاثيي الأبعاد تستبعد التصور المنسبن للآنيّة.



شكل ٥,١٢ مفارقة التوأم بإضافة توأم ثالث C يخضع لضعف عدد تسارعات التوأم B

تُفسّر مفارقة التوأم باتساق لو أن أنبوبي A وB الكونيين هما جسمان واقعيان رباعيا الأبعاد؛ عندئذ يكون التوأم A موجودًا عند كل الأحداث التي تضم أنبوبه الكوني. فارق الخمس سنوات الزمني عندما "يتقابل" التوأمان عند M يأتي من فرق الطول لأنبوبي التوأمين الكونيين بين الحدثين D وM؛ أي الكميتان المختلفتان لزمن التوأمين الحقيقي بين D وM. تقدم رؤية البُعْديّة الرباعية تفسيرًا محايدًا للسبب في أن التسارع لا يؤثر على كمية الزمن الحقيقي المقاس بواسطة التوأم B في شكل ٥,١١ أ: التسارع الذي يخضع له

التوأم B هو مجرد دلالة على أن أنبوبه الكوني مشوه، ولكن هذا التشوه لا يؤثر على زمنه الحقيقي لأن طول الأنبوب الكوني لا يتغير عندما يكون مشوهًا. الدور الوحيد للتسارع في شكل ٥,١١ أ هو توضيح أن أنبوب B الكوني مشوه وأن المسار من الحدث D إلى الحدث M مختلف، ويكون أقصر من المسار على طول أنبوب A الكوني بسبب الطبيعة الإقليدية الزائفة لزمكان مينكوفسكي. لو استقام أنبوب B الكوني وتراكب على أنبوب A الكوني، لكان طول أنبوب B الكوني مساويًا للقطعة DI من أنبوب A الكوني. الإدراك الجاد لوجود الأنبوبين الكونيين للتوأمين يعطي تفسيرًا واضحًا للحقيقة، الموضحة في شكل ٥,١٢، التي تقضي بأن الزمنين الحقيقيين للتوأمين B وC بين الحدثين D وM متساويان (تحديدًا ٥ سنوات). ببساطة، يكون طولا أنبوبي التوأمين الكونيين متساويين – القطعتان EI وIL من أنبوب C الكوني تساويان القطعتين JL وEJ من الخط الكوني المُقطّع (الذي يكون صورة مرآة لأنبوب B الكوني)، على التوالي.

ومهما يبدو من غموض، فإن مفارقة التوأم ما هي إلا متباينة المثلث في سياق الهندسة الإقليدية الزائفة لزمكان مينكوفسكي.

٥.٦ نسبنة الوجود والمراقبين في النسبية العامة

على حد علمي، تم التغاضي عن حجة قوية، قدمتها النسبية العامة، ضد كل من الآنيّة ونسبنة الوجود، أيْ ضد كل من التصورين قبل النسبوي والمنسبن في الرؤية الآنيّة. لنعتبر مراقبًا قصوريًا وحيدًا مع افتراض أن الواقع كون ثلاثي الأبعاد. في الزمكان المسطح يُمثّل المراقب القصوري بأنبوب كوني مستقيم، وتكون أزمنة الحاضر المناظرة للحظات مختلفة من الزمن الحقيقي للمراقب متوازية كما أنها لا تتقاطع. إلا أنه في الزمكان

المنحني يكون الأنبوب الكوني لمراقب قصوري (مراقب يتحرك بدون مقاومة، أيْ بالقصور الذاتي) جيوديسيًا (منحنيًا)، مما يعني أن أزمنة الحاضر المناظرة للحظات مختلفة من الزمن الحقيقي للمراقب تتقاطع بشكل عام. نتيجة لذلك، بعض الأحداث التي كانت في الماضي عند لحظة معينة قد تكون في المستقبل عند لحظة لاحقة. ينتج هذا الاستنتاج من افتراض أن الواقع بالنسبة إلى مراقب ما في النسبية العامة هو كون ثلاثي الأبعاد. وبالتالي فإن اعتبار ولو حتى مراقب وحيد في النسبية العامة يستبعد الآنيّة وأيضًا تصورها المنسبن، لأن الرأي القائل بنسبنة الوجود ينظر إلى كون مراقب ما على أنه ثلاثي الأبعاد، ولكن أي رؤية ثلاثية البعد تؤدي إلى الهراء المذكور أعلاه.

يمكن تفسير هذه الحجة في حالة مراقبين متسارعين في النسبية الخاصة [٨٦]، لأن أي مراقب متسارع يُمَثّل بأنبوب كوني مشوه في زمكان مسطح، وبالتالي فإن أزمنة الحاضر المناظرة للحظات مختلفة من أنبوب المراقب الكوني تتقاطع.

في الماضي، وخاصة في السنوات التي تلت ظهور النسبية الخاصة والعامة، كان هناك بعض الالتباس حول الحركة المتسارعة. كان هناك في كثير من الأحيان ادعاءات بأن النسبية الخاصة لا تصف الحركة المتسارعة، وأن النسبية العامة هي فقط التي تستطيع التعامل معها. من ناحية أخرى، في أوائل السبعينيات، تمت تسوية هذه القضية، حتى أن ميسنر، وثورن، و ويلر قد خصصوا قسمًا من كتابهم "الثّقَالة" بعنوان "المراقبون المتسارعون يمكن تحليلهم باستخدام النسبية الخاصة" للحركة المتسارعة [٥٦، ص ١٦٣]. الآن لم تعد هذه القضية تسبب التباسًا – فالنسبية العامة تصف الزمكانات المنحنية،

بينما تعني النسبية الخاصة بالزمكان المسطح. المراقبون المتسارعون بصورة مطلقة[*] (انظر الفصل السابع)، الذين يمثلون بأنابيب كونية لاجيوديسية، يتواجدون في كلا الزمكانين المنحني والمسطح.

اعتبر مراقبًا متسارعًا في زمكان مسطح للنسبية الخاصة أنبوبه الكوني موضح في شكل ٥,١٣. نتيجة لحقيقة أن أنبوب المراقب الكوني منحنٍ، فإن زمني الحاضر المناظريْن للحدثين P وQ من زمنه الحقيقي ليسا متوازيين ويتقاطعان عند الحدث O. عند الحدث P، تكون منطقة الزمكان بين الحدثين المميزة بواسطة قطع ناقص مُقطّع ماضيًا بالنسبة للمراقب المتسارع. لكن نفس منطقة الزمكان نفسه تقع في مستقبل المراقب المتسارع عند الحدث *اللاحق* Q. نصل إلى مثل هذا الهراء لأننا افترضنا أن الكون كان ثلاثي الأبعاد.

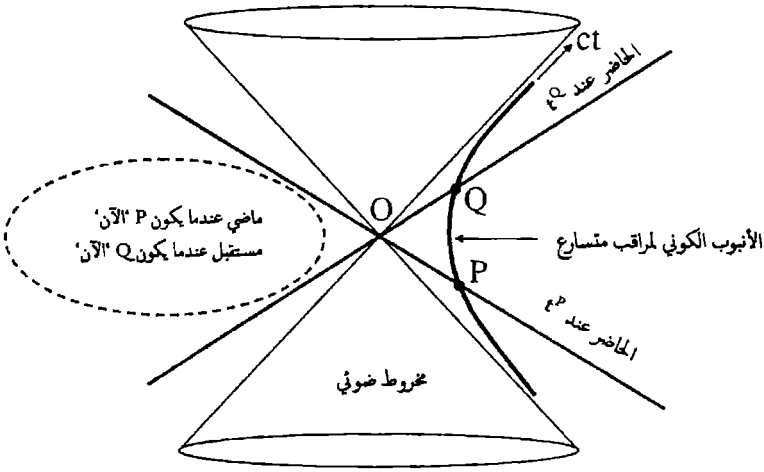
الوجود المؤكّد للمراقبين المتسارعين في النسبية الخاصة وأي مراقبين (قصوريين أو متسارعين بصورة مطلقة) في النسبية العامة (لأن أنابيبهم الكونية منحنية في زمكان منحنٍ) هو مظهر آخر يؤكد البُعْدِيّة الرباعية للكون. إنها أيضًا حجة ضد نسبنة الوجود، لأن التصور المنسبن للآنيّة ينظر لكون مراقب ما على أنه ثلاثي الأبعاد.

قد يختلف فيزيائي ما مع الحجة السابقة المعارضة للبُعْدِيّة الثلاثية للكون عن طريق لفت الانتباه إلى أن هناك قيودًا على حجم إطار متسارع في النسبية الخاصة [٥٦، ص ١٦٨]. تنتج هذه القيود من حقيقة أنه لا يمكن

(*) على الرغم من أن الأنبوب الكوني لمراقب متسارع بصورة مطلقة في زمكان منحنٍ ليس جسوديسيًا، فإنه يكون أكثر انحناءً من الجيوديسي. لهذا فإن أزمنة الحاضر لمثل هذا المراقب التي تناظر لحظات مختلفة من زمنه الحقيقي، تتقاطع أيضًا.

لنظام إحداثيات *عالمي* مصاحب للمراقب المتسارع أن يمتد نحو اليسار في شكل ٥,١٣ وراء الحدث O لأن الزمن الإحداثي ليس له معنى وراء هذا الحدث – ما يكون زمنًا ماضيًا عند الحدث P (في منطقة الزمكان داخل القطع الناقص المُقطّع) يكون زمنًا مستقبليًا عند الحدث اللاحق Q. بالإضافة لذلك، إحداثيات الأحداث الواقعة في منطقة الزمكان بين المخروطين الضوئيين الماضي والمستقبلي، التي تحتوي على القطع الناقص المُقطّع، لا يمكن تعيينها بواسطة إرسال واستقبال إشارات ضوئية [٥٦، ص ١٦٨]. يعمل الحدث O (هو في الواقع سطح ثنائي الأبعاد) كأفق للمراقب المتسارع – فلا يمكن استقبال وإرسال إشارات ضوئية من وإلى منطقة الزمكان الواقعة على يسار ذلك الحدث.

كل هذا بالطبع صحيح، ولكن هذه الاعتراضات تعني فقط بوصف أحداث الزمكان وليس لها علاقة بالسؤال عما إذا كانت موجودة أم لا. حقيقة أنه لا يمكن لمراقب متسارع أن يتواصل مع الأحداث الواقعة على يسار الحدث O (بين المخروطين الضوئيين الماضي والمستقبلي عند O) لا صلة لها بوجود هذه الأحداث من عدمه. أفضل طريقة لتوضيح ذلك هي اعتبار حقيقة أن جميع المراقبين القضوريين المتحركين بالتلازم لحظيًا عند الأحداث المختلفة من الأنبوب الزمني للمراقب المتسارع يمكنهم التواصل مع الأحداث على يسار الحدث O (بين المخروطين الضوئيين الماضي والمستقبلي عند O). وإذا كانت هذه الأحداث موجودة بالنسبة إلى المراقبين القصوريين المتحركين بالتلازم، فينبغي أن تكون موجودة أيضًا بالنسبة إلى المراقب المتسارع.



شكل ٥,١٣ حيث إن الأنبوب الكوني لمراقب متسارع يكون منحنيًا، فإن الزمنين الحاضرين المناظرين للحظتين من زمنه الحقيقي يتقاطعان عند الحدث O. تكون أحداث منطقة الزمكان المميزة بواسطة قطع ناقص مُقطّع ماضيًا بالنسبة للمراقب المتسارع عندما يكون الحدث P "الآن". من ناحية أخرى، تقع الأحداث نفسها في مستقبل المراقب عندما يكون الحدث Q "الآن"

٥,٧ ملخص

بطرح سؤال بُعْدِيَّة الأجسام المتضمنة في نسبية التزامن، وتقلّص الطول، وتمدد الزمن، تبين أن الرؤية الآنيَّة يمكنها تجنب التناقض المباشر مع النسبية إذا اعتبر وجود تلك الأجسام منسبنًا أنطولوجيًا. لكن حتى هذا التصور المنسبن للآنيَّة يناقض النسبية والدليل التجريبي النسبوي كما ظهر من تحليل مفارقة التوأم في قسم ٥,٥ والتحليل الوارد في قسم ٥,٦ عما هو موجود بالنسبة لمراقب وحيد في النسبية العامة أو مراقب متسارع وحيد في النسبية الخاصة. وبالتالي تكون الرؤية الوحيدة المتسقة مع النسبية هي البُعْدِيَّة الرباعية.

الفصل السادس

لماذا تُعتبر قضية طبيعة الزمكان بالغة الأهمية؟

بالنسبة إلى الفيزيائيين، هناك شقان للإجابة على السؤال الوارد في عنوان هذا الفصل:

- من وجهة نظر الأفضية متعددة الأبعاد في الفيزياء الحديثة، يبدو من الطبيعي تماما أن تعالج مسألة طبيعة الزمكان أولاً.

- إذا كان الكون بالفعل رباعي الأبعاد، بحيث تكون الأجسام الفيزيائية الماكروية أنابيب كونية أو خطوطًا كونية (في حالة الجسيمات الصغيرة)، فينبغي على برنامج مينكوفسكي – أي أن القوانين الفيزيائية ربما تجد صياغتها بالغة الإتقان في صورة علاقات بين خطوط كونية – أن يُنفذ بحزم.

سوف يتم إيضاح مدى ما قدمته فكرة مينكوفسكي من فهم أعمق للظواهر الفيزيائية في الجزء الثالث من الكتاب، وبالأخص في الفصل التاسع، حيث سيُنظر للقصور الذاتي على أنه نابع من إجهاد رباعي الأبعاد ينشأ في الأنبوب الكوني المشوه لجسم متسارع.

قضية الحالة الأنطولوجية للزمكان ليست أقل أهمية عند فلاسفة الفيزياء، والفلاسفة، وجميع من يرغب في التأكد من أن رؤيتهم الكونية لا

تتعارض مع العلم الحديث. التضمين الأكثر أهمية للسؤال عما إذا كان الزمكان يمثل كونًا واقعيًا رباعي الأبعاد أم لا يكون دون شك من أجل فهمنا للواقع. كما رأينا في الفصل الخامس، لو أن الكون ثلاثي الأبعاد لكانت التأثيرات النسبوية الكينماتية والتجارب التي تؤكدها مستحيلة. وبهذا استُبعدت بالقطع فكرة البُعْدِيَّة الثلاثية عن طريق التأثيرات النسبوية، التي بالفعل تكون، كما رأينا، مظاهر لبُعْدِيَّة الكون الرباعية على نحو ما أثبت مينكوفسكي. لقد رأينا أيضًا في الفصل الخامس أن محاولة الاحتفاظ بفكرة البُعْدِيَّة الثلاثية عن طريق نسبنة الوجود تناقض أيضًا الدليل التجريبي الذي أيد النسبية:

• في الرؤية الآنيَّة المنسبنة، الطريقة الوحيدة لتفسير تقلّص الطول تكون بدلالة القوى المشوِّهة المؤثرة على الذرات لجسم ثلاثي الأبعاد متقلص نسبويًا. ولكن ذلك التفسير يناقض حقيقة أن الفضاء نفسه يتقلص كما أكدت تجربة المَيُون، مما يعني أن تقلّص الطول لم يمكن تفسيره كتأثير مُشَوِّه.

• في الرؤية الآنيَّة المنسبنة، الموجود بالنسبة لكل مراقب هو كون وحيد ثلاثي الأبعاد وأجسام ثلاثية الأبعاد. لكن بفرض أن التوأمين في مفارقة التوأم هما جسمان عاديان ثلاثيا الأبعاد في إدراكنا وتصوراتنا، موجودان فقط عند لحظتهما الحاضرة، فإن هذا التأثير سيكون مستحيلاً كنتيجة نظرية وتجريبية على حد سواء.

• لا يمكن أن يكون مراقب في النسبية العامة أو مراقب متسارع في النسبية الخاصة مؤيدًا للرؤية الآنيَّة المنسبنة، لأن تلك الرؤية تؤدي إلى الهراء التالي – بعض الأحداث عند الحدث P كما هو مبين في شكل ٥,١٣ تكون ماضيًا بالنسبة إلى المراقب، بينما عند حدث لاحق Q، تقع نفس الأحداث نفسها في مستقبل المراقب.

على الرغم من أن كلاً من الحجج السابقة، على حدة، تكون كافية لاستبعاد فكرة نسبنة الوجود، فسوف نرى في قسم ٦,١ من هذا الفصل أن اصطلاحية التزامن تعطي حجة إضافية ضد هذه الفكرة.

وعلى الرغم من أن مصير الآنيّة قد تحدد بالقطع عن طريق الوجود المؤكد للدليل *التجريبي* النسبوي، فإن مقاومة قبول أن الواقع هو كون مينكوفسكي رباعي الأبعاد، بصرف النظر عما إذا كان مسطحًا (يمثل بزمكان مينكوفسكي) أو منحنيًا (يمثل بأي زمكان نسبوي)، تكون بعيدة كل البعد عن الانتهاء. سوف يطرح الفصل العاشر والملحق A حججًا معتمدة على فيزياء الكم، التي لا يمكن بموجبها أن يكون الواقع هو كون النسبية الساكن رباعي الأبعاد (حيث يكون كل شيء، بما في ذلك نواتج التجارب الممكنة، أبديًا في الوجود) لأن فيزياء الكم تخبرنا بأن الناتج لتجربة ما لا يمكن التنبؤ به على وجه اليقين قبل قياسه (أيْ قبل أن يصبح موجودًا).

يتعامل الملحق B مع حجج أكثر عمومية حول مدى التعويل على المعرفة العلمية. إن تلك الحجج هي مظاهر مؤيدة للنسبنة الفلسفية التي فقدت مصداقيتها من خلال الممارسة العلمية (عن طريق الأخذ في الاعتبار طريقة عمل العلم)، ولكنها تكافح بعناد للبقاء على قيد الحياة. طبقًا لذلك، لا يمكن أن نكون متأكدين من صحة نظرياتنا، ولهذا لا يمكن تقبل الحجج من نظرية النسبية 'المحتملة الخطأ'. ولكن حتى عند هذه المرحلة أظن أنه من حقنا أن نسأل – ماذا عن التجارب التي أكدت التأثيرات النسبوية وأي منها قد يكون مستحيلاً لو أن الكون ثلاثي الأبعاد؟ هل ستحاول النسبنة الفلسفية نسبنة النتائج التجريبية أيضًا؟

وبما أن السؤال حول طبيعة الزمكان هو الأكثر أهمية لفهمنا للواقع، فإن هذا الفصل سوف يناقش عددًا من القضايا الجوهرية التي تبدو مختلفة تمامًا في كون ثلاثي الأبعاد وفي كون رباعي الأبعاد. يعرض قسم ٦,١ حجة أخرى مستقلة عن البُعْدِيَّة الرباعية للكون، عن طريق الكشف عن الصلة العميقة بين قضايا بُعْدِيَّة الكون (أيْ طبيعة الزمكان) واصطلاحية التزامن للأحداث المتباعدة الناتجة من استحالة تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد. بصيغة أخرى، يعطي قسم ٦,١ حجة أخرى ضد الآنيَّة ونسبنة التزامن. تناقش الأقسام الثلاثة الأخيرة تضمينات السؤال عن بُعْدِيَّة الكون بالنسبة للصيرورة الزمانية، وانسياب الزمن، والوعي، والإرادة الحرة.

٦,١ سرعة الضوء في اتجاه واحد واصطلاحية التزامن

سرعة الضوء المقاسة هي متوسط السرعة جيئة وذهابا. السرعة في اتجاه واحد لا يمكن قياسها بمفردها إلا بعد أن تم وضع خطوط الآن وبالتالي لا يمكن استخدامها في وضع خطوط الآن. وبهذا يحدث إخفاق في رسم خطوط الآن التي يمكن إزالتها فقط بواسطة افتراض أو اصطلاح اختياري. اعتمد الاصطلاح في الواقع على أساس أن سرعتي الضوء في الاتجاهين المتعاكسين متساويتان (بالنسبة إلى المراقب). يجب النظر إلى خطوط الآن الناتجة على أنها متساوية الاصطلاحية.

أ. س. إدينجتون [٦٠]

إن أخذ قضية طبيعة الزمكان بجدية يوفر مدخلاً جديدًا ومثمرًا لمسألتين قديمتين ولكنهما مازالتا خلافيتين ومتصلتين جوهريًا – استحالة قياس سرعة الضوء في اتجاه واحد والتضمين المترتب عليها بأن تزامن الأحداث المتباعدة هو مسألة اصطلاح (انظر مثلاً [١٤، ٦١، ٦٢، ٦٣،

٦٤، ٦٥، ٦٦، ٦٧، ٦٨، ٦٩، ٧٠، ٧١، ٧٢، ٧٣، ٧٤، ٧٥]). كما سنرى، هذا المدخل سيسمح لنا باستنتاج درس معرفي (أبستمولوجي) من استحالة تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد والتضمين المباشر بأن التزامن يكون اصطلاحيًا. يتضح أن الحلقة المفرغة – لتعيين ما إذا كان حدثان متباعدان متزامنين، يجب معرفة سرعة الضوء بينهما في اتجاه واحد، ولكن لتعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد، يجب على الحدثين أن يكونا متزامنين – هي دلالة على الحاجة إلى تغيير عميق في نظرتنا للواقع.

وبالفعل، إذا حاولنا أن نفهم الرسالة التي تنقلها لنا الحلقة المفرغة من خلال تحليل تأثير اصطلاحية التزامن على بُعْدِيَّة الكون وما هو موجود، فإن النتيجة تكون عميقة. إن استحالة قياس سرعة الضوء في اتجاه واحد في تجربة ما توضح أنه ينبغي تعيينها حسب الاصطلاح. هذا يعني أن تزامن الأحداث المتباعدة يكون اصطلاحيًا أيضًا. وبما أن الكون ثلاثي الأبعاد(الحاضر) يُعرِّف على أنه كل شيء موجود بالتزامن عند لحظة 'الآن'، فإن اصطلاحية التزامن تعني أن تعريف الحاضر هو أيضًا مسألة اصطلاح. وبالتالي، لو كان الواقع هو كون ثلاثي الأبعاد، فيتضح أن ما هو موجود سيعتمد على اختياراتنا. وبما أن وجود الكون الفيزيائي لا يعتمد على تعاريفنا فينتج من ذلك أن اصطلاحية التزامن قد تكون مستحيلة لو كان الواقع كونًا ثلاثي الأبعاد.

دعنا أولاً نرى لماذا لا يمكن تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد تجريبيًا. افترض أننا نريد قياس سرعة الضوء في اتجاه واحد من نقطة A إلى نقطة بعيدة B. لكي نفعل ذلك، نحتاج لمعرفة المسافة بين A وB والزمن الذي يستغرقه الضوء لينتقل من A إلى B. يتطلب قياس الزمن عند مواقع متباعدة ضرورة أن تكون الساعات الرقمية الدقيقة (في مثالنا هذا تكون عند A وB) متواقتة، أيْ ينبغي أن تُظهِر القراءة نفسها على شاشاتها بالتزامن.

لذا قبل قياس سرعة الضوء في اتجاه واحد بين A وB، ينبغي مواقتة الساعتين عند النقطتين. إحدى الطرق لفعل ذلك هي إرسال إشارة (إشارة ضوئية تكون الأكثر ملاءمة لسرعتها العظيمة) من A إلى B، *معلوم* سرعتها في اتجاه واحد. ولكن هذا يؤدي بنا إلى حلقة مفرغة – لتعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد (أو أي إشارة) ينتقل من A إلى B، ينبغي أن تكون الساعتان عند تلك النقطتين متواقتتين؛ ولكن لمواقتتهما، يتحتم معرفة سرعة الضوء الأحادية مقدمًا.

هناك طريقة أخرى لمحاولة مواقتة الساعتين عند A وB، يستخدم فيها الانتقال البطيء لساعة ثالثة C من A إلى B. تكون الساعة C متواقتة في البداية مع الساعة A، ثم تُنقل ببطء إلى النقطة B، حيث تكون الساعة B متواقتة مع الساعة C. تسمى هذه الطريقة الثانية *الانتقال البطيء* لأنه من المفترض أن الساعة الثالثة، نتيجة لحركتها البطيئة، ليست معرضة لتمدد الزمن النسبوي، أو بالأصح فإن هذا التأثير يمكن إهماله. ولكن التحليل الدقيق يوضح أن تمدد الزمن (مهما كان صغيرًا) يلعب دورًا رئيسيًا في فهم تزامن الساعتين المتباعدتين بواسطة ساعة ثالثة. لفهم هذا، لاحظ أن الساعة C تقيس زمنها الحقيقي، وعندما تصل إلى B، لا يمكن ضبط الساعة هناك لتعطي القراءة نفسها على شاشة الساعة C، لأن الساعة B لا تقيس وقت C الحقيقي، وإنما بالأصح تقيس وقتًا متمددًا نسبويًا. لكي تكون الساعة B متواقتة مع الساعة A، ينبغي أن تضبط لتُظهر زمنًا أكبر من الزمن الذي تظهره شاشة الساعة C، لأنه ينبغي على الساعتين عند A وB أن تُظهرا الزمن المتمدد نسبويًا للساعة C (تذكر المناقشة المصاحبة لشكل ٤,٢٧).

بهذا نصل على الفور إلى نفس الحلقة المفرغة نفسها كما في حالة استخدام الإشارات الضوئية لمواقتة الساعتين عند A وB. نحن بحاجة إلى حساب مقدار تمدد الزمن لتعيين الزمن الذي ينبغي إضافته للزمن الحقيقي للساعة C، عندما تصل إلى B، الذي يكون ضروريا لمواقتة الساعة B. لعمل

ذلك نحتاج إلى معرفة سرعة الساعة C في اتجاه واحد، ولكن لقياس تلك السرعة، يجب أن تكون الساعتان A وB متواقتتين بالفعل(*).

إنه للغز كبير لماذا لا يمكن إيجاد سرعة الضوء في اتجاه واحد تجريبيًا، مما يعني أن الطريقة الوحيدة لتعيينها تكون حسب الاصطلاح. بل إنه اللغز يصبح أكبر لأن اصطلاحية سرعة الضوء في اتجاه واحد تقتضي ضمنًا اصطلاحية التزامن للأحداث المتباعدة أيضًا. أول من أدرك هذه الاصطلاحية المزدوجة هو بوانكاريه [٦١، ص ٢٢٢]، ثم آينشتين بعده بوقت قصير [١٤]. ولكن لم يفطن أي منهما إلى تضميناتها العميقة لرؤيتنا الكونية. كان إيدينجتون [٦٠] هو من أدركها في عام ١٩٢٨، كما يتضح من مقولته في أول هذا القسم. ولكن مع الأسف لم تستكشف تلك التضمينات ما هو أبعد من ذلك (فيما عدا [٧٠، ٧١، ٧٥]).

دعنا نحاول فهم ما هي المعرفة الكونية التي تكون مستترة في الحلقة المغلقة التي نحصل عليها كلما حاولنا تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد، وفي الاصطلاحية المزدوجة الناتجة لسرعة الضوء في اتجاه واحد ولتزامن الأحداث المتباعدة. اعتبر ساعتين A وB في حالة سكون بالنسبة لبعضهما، ممثلتين بأنبوبي كونيهما كما يظهر في شكل ٦,١. أُرسلت إشارة ضوئية من الساعة A في اتجاه الساعة B عند اللحظة t_1^A. تصل الإشارة عند B عند اللحظة t_2^B، فتنعكس للخلف على الفور في اتجاه A، حيث تصل عند t_3^A.

(*) أحيانًا يكون من المغري الاعتقاد بأن الحلقة المفرغة هنا يمكن تجنبها لو أن الساعة C ذاتها هي التي استخدمت لقياس زمن رحلتها من A إلى B، بدلاً من الساعتين عند A وB. عندئذ يتضح أن سرعة C في اتجاه واحد (اللازمة لتعيين مقدار تمدد الزمن) يمكن حسابها، لأن زمن C الحقيقي يقاس مباشرة، ومن المفترض أن المسافة بين A وB معلومة. ولكن في الواقع، تلك المسافة ليست معلومة، لأنها متقلصة نسبويًا من وجهة نظر C. لذا، لتعيين مقدار تقلص الطول، ينبغي أن تكون سرعة C في اتجاه واحد معلومة ونصل مرة أخرى للحلقة المفرغة.

نتيجة للحلقة المفرغة التي تمت مناقشتها أعلاه، لا تخبرنا هذه التجربة أي شيء عن سرعتي الضوء من A إلى B أو من B إلى A؛ وتسمح لنا فقط بتعيين زمن رحلة الذهاب والعودة $\Delta t = t_3^A - t_1^A$. وهكذا نفهم من شكل ٦,١ لماذا لا يكون لدينا خيار، وعلينا تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد حسب الاصطلاح. هذا يعني أن تزامن الأحداث المتباعدة يكون اصطلاحيًا هو أيضًا – يمكن تعيين أي اللحظات من الفترة $t_3^A t_1^A$ تكون متزامنة مع t_2^B فقط حسب الاصطلاح. عمومًا، يمكن أن تكون الحظة t^A، التي يمكن اعتبارها متزامنة مع t_2^B، أي لحظة تنتمي للفترة $t_3^A t_1^A$:

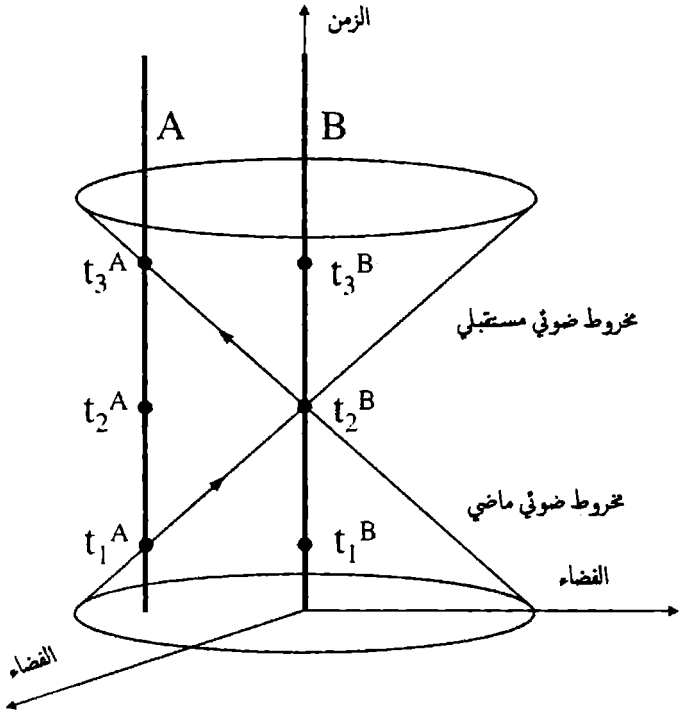
$$t^A = t_1^A + \varepsilon(t_3^A - t_1^A) .$$

حيث $0 < \varepsilon < 1$. الخيار $\varepsilon = 1/2$ ينـاظر الاصطلاح النموذجي $t^A = t_2^A$، الذي تكون طبقًا له سرعتا الضوء من A إلى B و من B إلى A متساويتين.

من الطبيعي تمامًا أن نسأل عن المعنى الفيزيائي لهذا الاصطلاح المزدوج الذي لا مفر منه. الميل إلى القول بأنه لا يوجد أي معنى فيزيائي هنا، لأن الأمر لا يعدو أن يكون مسألة وصف، ودائما ما نختار الوصف الأبسط،(*) يكون قولاً غير مقبول تماما. هذا النوع من 'التفسير' ينزع إلى منعنا من طرح أسئلة ذات صلة،(**) مما يؤدي بنا إلى اكتشاف معرفة مستترة في تلك المواقف المحيرة. بالإضافة إلى أن المعرفة المستترة التي تحاول الحلقة المفرغة في تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد (والاصطلاح المزدوج الناتج) كشفه لنا تكون بالفعل عميقة.

(*) في هذه الحالة يكون الاصطلاح الأبسط هو أن سرعتي الضوء ذهابًا وإيابًا متساويتان.

(**) على سبيل المثال، يخبرنا حدسنا أن الضوء، في الواقع، يسافر بسرعة معينة، وما تكون عليه هذه السرعة لا يعتمد علينا. لماذا إذا يكون من المستحيل إيجاد تلك السرعة تجريبيًا؟ إن هذا سؤال متعلق بالموضوع، ولكن إجابته، كما سنرى، غير متوقعة.

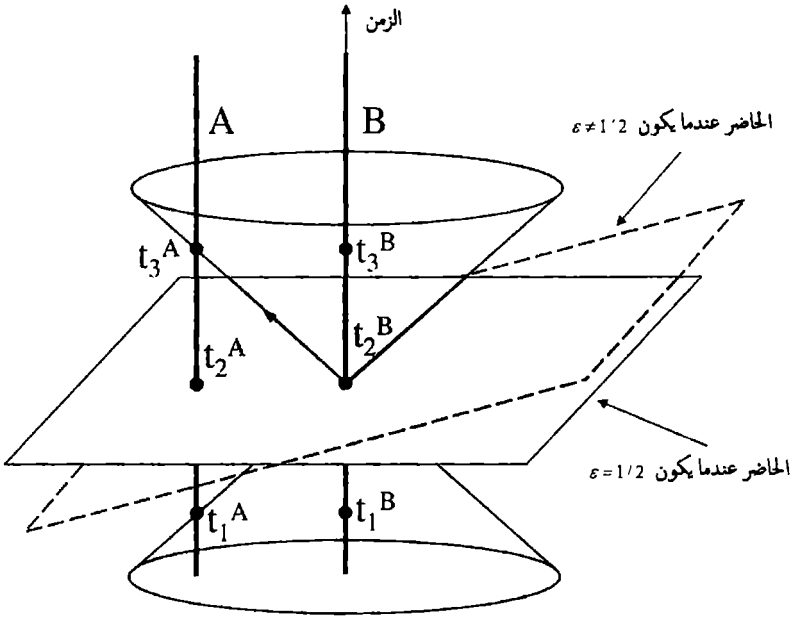


شكل ٦,١ تمثل الخطوط الرأسية المتوازية الأنبوبين الكونيين للساعتين A وB الساكنتين بالنسبة لبعضهما. عند لحظة ما t_1^A، ترسل إشارة ضوئية من الساعة A في اتجاه الساعة B. تنعكس الإشارة عند B عند t_2^B وتصل مرة أخرى إلى A عند t_3^A. إن اختيار أي اللحظات من الفترة $t_3^A t_1^A$ تكون متزامنة مع t_2^B هو مسألة اصطلاح لأنه لا يمكن تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد تجريبيًا.

وبما أن الكون ثلاثي الأبعاد (الحاضر) مُعَرَّف بدلالة التزامن – كل شيء موجود بالتزامن عند اللحظة الحاضرة – فإن اصطلاحية التزامن تعني اصطلاحية ما هو موجود. لو اخترنا الاصطلاح الأبسط الذي يقضي بأن سرعتي الضوء ذهابًا وإيابًا متساويتان (بمعنى أن $\varepsilon = 1/2$)، فإن الحدثين، اللذين يقعان عند اللحظتين t_2^A و t_2^B، كما يظهر في شكل ٦,١، يكونان

متزامنين. يُعرِّف هذا الاختيار الكون ثلاثي الأبعاد المتعامد مع الأنبوبين الكونيين للساعتين A وB، كما هو مبين في شكل ٦,٢. لو اخترنا $\varepsilon \neq 1/2$، عندئذ ستكون لحظة مختلفة من الفترة $t_3^A t_1^A$ هي المتزامنة مع t_2^B (مما يعني أن سرعتي الضوء ذهابًا وإيابًا ستكونان مختلفتين). وبالتالي سيكون الكون ثلاثي الأبعاد معرفًا بصورة مختلفة ولن يكون متعامدًا مع أنبوبي A وB الكونيين.

لذا فإن الرسالة التي كانت تحاول الحلقة المفرغة (والاصطلاحية المزدوجة الناتجة) إيصالها لنا مدهشة حقًا – وهي أن الواقع ليس كونًا ثلاثي الأبعاد، لأنه لو كان كذلك، لاعتمد ما هو موجود على اختيارنا، ولكان أيضًا أمرًا اصطلاحيًا.



شكل ٦,٢ على حسب اختيار ε، يكون ما هو موجود كحاضر مسألة اصطلاح أيضًا.

ولكن لن يكون ما هو موجود أمرًا اصطلاحيًا إذا كان الواقع كونًا رباعي الأبعاد له بعد واحد زماني وثلاثة أبعاد مكانية. في كون كهذا، تكون اصطلاحية التزامن أمرًا مبتذلاً – جميع الأحداث في هذا الكون واقعية، وبالفعل لدينا الحرية، إذا أصررنا على استخدام لغتنا ثلاثية الأبعاد، في اختيار أي المقاطع العرضية ثلاثية الأبعاد ينبغي النظر إليه على أنه حاضرنا. تجد أيضًا الحلقة المفرغة في تعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد تفسيرًا طبيعيًا – وهو أن الضوء لا يتحرك على الإطلاق لأنه خط كوني معين للأبد في الزمكان. لقد وصلنا للحلقة المفرغة لأننا سألنا سؤالاً خاطئًا عن المقدار الحقيقي لسرعة الضوء في اتجاه واحد، بينما لا ينتقل الضوء في الزمكان (في الواقع المطلق طبقًا لمينكوفسكي)، وبالتالي لا يمتلك خاصية السرعة تلك. لو أننا نصر على استخدام لغتنا ثلاثية الأبعاد، فإن لنا الحرية في اختيار مقدار سرعة الضوء، لأنها مجرد وصف(*) للأنبوب الكوني للضوء والأنبوبين الكونيين للساعتين التي ينتقل بينهما الضوء.

لقد رأينا أن نسبية التزامن تكون مستحيلة في كون ثلاثي الأبعاد، لأن مثل هذا الكون يعرِّف فئة متميزة موضوعيًا (من صميم وجوده) من الأحداث المتزامنة، بينما تقتضي نسبية التزامن ضمناً أن تكون تلك الفئة غير موجودة. رأينا الآن أن التزامن لا يمكن أيضًا أن يكون اصطلاحيًا في كون ثلاثي الأبعاد. السبب واحد – اصطلاحية التزامن تستبعد وجود فئة متميزة

(*) نرى السخرية مرة أخرى. حتى في الوقت الحالي، وبعد مائة عام من تقديم مينكوفسكي لمفهوم الزمكان، لا يزال من المغري التفكير في أن الواقع هو كون ثلاثي الأبعاد، بينما يكون الزمكان هو مجرد وصف. ولكن يوضح الدليل التجريبي النسبوي والحلقة المفرغة في أي محاولة لتعيين سرعة الضوء في اتجاه واحد أن الواقع هو كون رباعي الأبعاد، بينما تكون الصورة ثلاثية الأبعاد للضوء المتحرك والأجسام ليست إلا وصفًا مريحًا تحدد من الطريقة التي ندرك بها هذا الكون المطلق.

موضوعيًا من الأحداث المتزامنة. توضح كلٌ من نسبية التزامن واصطلاحية التزامن أنه لا توجد فئة متميزة من أحداث الزمكان، مما يعني أن جميع أحداث الزمكان واقعية.

لعل أفضل طريقة لتوضيح أن نسبية التزامن واصطلاحية التزامن لهما أصل مشترك تكون عن طريق حقيقة أنه "في النسبية الخاصة، تُعرِّف البنية السببية للزمكان مفهوم "المخروط الضوئي" لحدث ما، ولكن لا تُعرِّف مفهوم التزامن" [٧٦]. هذا يعني أن جميع الأحداث الواقعة خارج المخروط الضوئي الموضح في شكل ٦,٢ لها الحال نفسها من حيث العلاقات السببية في الزمكان، وبالتالي لا توجد فئة من تلك الأحداث يمكن تعريفها على أنها متزامنة.علي الرغم من ذلك، لو أننا نصر على استخدام مفهوم التزامن في النسبية والزمكان، حيث إنه لا يعكس أي موضوعية، فإننا نصل إلى استنتاجين:

- يكون التزامن نسبيًا عند اعتبار مراقبين في حالة حركة نسبية – لو تقابل المراقبين عند قمة المخروط الضوئي في شكل ٦,٢، أيْ عند اللحظة t_2^A، فإنه سيكون لديهما فئتان مختلفتان من الأحداث المتزامنة (وأزمنة حاضر مختلفة)، ولكن لا تكون أي من تلك الفئتين أكثر موضوعية من الأخرى، لأن جميع الأحداث خارج المخروط الضوئي يكون حالها متساوي.

- عند اعتبار مراقب وحيد، يكون التزامن اصطلاحيًا السبب نفسه – جميع الأحداث خارج المخروط الضوئي يكون حالها متساوٍ ويكون المراقب حرًا في اختيار فئات مختلفة من الأحداث على أنها متزامنة، أيْ أزمنة حاضر مختلفة كما هو مبين في شكل ٦,٢.

وبالتالي، نتيجة لأصلهما المشترك – بأنه لا توجد فئة متميزة موضوعيًا من الأحداث بين أحداث المنطقة الواقعة خارج المخروط

الضوئي[*] – فإن نسبية التزامن تقتضي ضمناً اصطلاحية التزامن والعكس بالعكس.[**] أظن أن هذا بالأخص يجب التأكيد عليه لأن أي ادعاء بأن التزامن نسبي ولكنه ليس اصطلاحيًا يصل إلى تناقض في المعنى: لا توجد فئة من الأحداث متميزة موضوعيًا (نتيجة نسبية التزامن)، ولكن هناك فئة متميزة موضوعيًا من الأحداث المتزامنة (نتيجة عدم اصطلاحية التزامن).

لم يتضح فقط أن أطروحة الاصطلاحية هي حجة لبُعْدِيَّة الكون الرباعية [٧٠، ٧١]، بل إنها أيضًا حجة ضد نسبية الوجود، لأنه بحسب الرؤية الآنيّة، يكون الواقع بالنسبة إلى كل مراقب هو كون ثلاثي الأبعاد. ولكن ذلك يكون مستحيلاً لأنه قد يعني أن ما هو موجود بالنسبة إلى كل مراقب قد يكون مسألة اصطلاح.

ونتيجة للصلة بين اصطلاحية التزامن وبُعْدِيَّة الكون – لا يمكن للتزامن أن يكون مسألة اصطلاح في كون ثلاثي الأبعاد، ولكنه اصطلاحي لا محالة في كون رباعي الأبعاد – تكون أي حجة لواقع الزمكان حجة لأطروحة الاصطلاحية. والعكس بالعكس – أيّ حجة في صالح اصطلاحية التزامن

(*) لقد أكدنا هنا أنه لا توجد فئة متميزة من الأحداث من حيث العلاقات السببية، ولكن كما رأينا في هذا الفصل وفي الفصل الخامس، يكون هذا الادعاء أقوى بكثير – لا توجد فئة متميزة من الأحداث، لأن جميع أحداث الزمكان ينبغي أن تكون متساوية الواقعية لتجنب التناقض المباشر مع الدليل التجريبي.

(**) أحيانًا يُزعَم أن نظرية مالامينت [٦٦] دحضت أطروحة الاصطلاحية. أظن في ضوء التحليل هنا أن ما أثبته كان أن التواقت النموذجي $\varepsilon = 1/2$ هو الأبسط. لو فُرض أن نظريته هذه تعني أن التزامن المتباعد ليس مسألة اصطلاح، فسينتج أن فئة الأحداث المتزامنة (المحددة باختيار $\varepsilon = 1/2$) قد تكون متميزة موضوعيًا (لأنه لا يمكن تعيينها حسب الاصطلاح) وبالتالي ينبغي على جميع المراقبين في حالة حركة نسبية أن يشتركوا في نفس فئة الأحداث المتميزة نفسها موضوعيًا. لهذا يتضح أن التزامن ينتهي إلى أن يكون مطلقًا، إذا لم يكن اصطلاحيًا.

هي حجة لبُعْدِيَّة الكون الرباعية. أشار 'ديكس' في ورقة بحثية نشرت مؤخرًا [٧٧] أن اصطلاحية التزامن تكون حتمية في إطار مرجعي دوار:

لا يمكن استخدام إجراءات الإشارة الضوئية لآينشتين، ولا الانتقال البطيء للساعات، لإنشاء مفهوم عالمي للتزامُن على القرص الدوار [...]. أطر الأسناد اللاقصورية هذه، والزمكانات النسبوية العامة، تبدو أنها ساحة يمكن فيها الدفاع عن أطروحة أن التزامن (العالمي) اصطلاحي دون خلاف.

من الواضح أنه لا يمكن تفسيرحقيقة أن هذه الحجة صالحة فقط في الأطر الدوارة على أنها تعني أن الكون يكون رباعي الأبعاد فقط بالنسبة إلى مراقبين في أطر دوارة. هؤلاء المراقبون ليسوا في حاجة إلى الحجج المناقشة في الفصل الخامس ليستنتجوا أنهم يعيشون في كون رباعي الأبعاد. الحقيقة الراسخة التي تقضي بأن التزامن يكون اصطلاحيًا في تلك الأطر تقتضي ضمنًا البُعْدِيَّة الرباعية للكون. وإلا، لو أصر المراقبون الدوارون على أن ما يوجد هو الكون العادي ثلاثي الأبعاد، فسيكون من رهن اختيارهم أن يقرروا ما الذي ينظر إليه على أنه موجود بالتزامن عند لحظتهم الحاضرة؛ أي ما يكون عليه الكون ثلاثي الأبعاد سوف ينتهي إلى أن يكون اصطلاحيًا. ولكن إذا كان الكون رباعي الأبعاد بالنسبة لمراقبين دواريين، فمن الحتمي أنه رباعي الأبعاد بالنسبة لجميع المراقبين على حد السواء.

٦,٢ الصيرورة الزمانية

التمييز بين الماضي والحاضر والمستقبل هو مجرد وهم، ولكنه مستمر وباقٍ بإصرار.

أ. آينشتين [٨٨، ص ٥١]

غالبًا ما يُعتقد أن الصيرورة الزمانية وانسياب الزمن أنهما يتعاملان مع القضايا نفسها– التقسيم الموضوعي للأحداث إلى ماضي وحاضر ومستقبل، فرض أن أحداث الحاضر هي فقط الواقعية، والانتقال الثابت (١) لأحداث المستقبل إلى أحداث الحاضر (٢) ولأحداث الحاضر إلى أحداث الماضي. في الرؤية الآنيّة، هذا هو الحال بالفعل، ولكن في كون رباعي الأبعاد، لا تكون الأحداث فيه منقسمة موضوعيًا إلى ماضي وحاضر ومستقبل، ما زال من الممكن الحديث عن انسياب الزمن الذي لا يمكنه،على الرغم من ذلك، فإن يكون فقط معتمدًا على العقل. سنعود في هذا القسم لقضية تقسيم الأحداث إلى ماضي وحاضر ومستقبل، بسبب المحاولات المستمرة لبناء رؤية تحاول إيجاد سبب موضوعي لشعورنا بانسياب الزمن.

إن ما أجده الأكثر غرابة هي إجابات السؤال "ما الكون؟" التي تستمر، لعقود بعد ظهور النسبية، في كونها معتمدة على تصوراتنا وتتجاهل تمامًا المدخل العلمي القويم – لفحص ما يمكن للدليل التجريبي، الذي أكد التأثيرات النسبوية، أن يخبرنا به عن هذا السؤال. ها هو مثال نمطي لتلك الرؤية بأن الصورة الزمكانية النسبوية للكون (غالبًا ما تسمى الكون الكتْلي) لا يمكن الوثوق بها، لأن ما ندركه على أنه انسياب الزمن يُعتَقَد أنه يعكس ظاهرة موضوعية [٨٩]:

> **ولكن هذه الصورة 'للكون الكتْلي'، الذي يتكون من شبكة أبدية من 'الخطوط الكونية' في فضاء رباعي الأبعاد، وعلى الرغم مما اقترحته النظرية النسبية بشدة، تعتبر قطعة من ميتافيزيقا غير مبررة. وبما أن مفهوم التغير، لشيء ما يحدث، هو عنصر لا يمكن فصله عن مفهوم الإحساس الفطري بالزمن وأنه عنصر ضروري لرؤية العالم للواقع، فإنه من غير الوارد تمامًا أن تتطلب منا الفيزياء النظرية الاحتفاظ بالرؤية الإليائية القائلة بأنه لا شيء يحدث في 'الكون الموضوعي'. هنا، كما في فلسفة العلوم، غالبًا، يُساء فهم التحديد المفيد في صيغة التمثيل بالنسبة لقصور الكون.**

السؤال الواضح هنا هو: كيف يعرف شخص ما يدافع عن مثل تلك الرؤية أنّ " مفهوم التغير، لشيء ما يحدث، هو [...] عنصر ضروري لرؤية العالِم للواقع"؟ لا يمكن أخذ هذا كأمر مسلم به، لأنه هو السؤال الجوهري الذي طرحته النسبية: هل الصيرورة الزمانية سمة موضوعية للكون، أم أن العالم هو كون كتْلي رباعي الأبعاد؟ على حد علمي، لم يسأل أي من مؤيدي رؤية أن الصيرورة الزمانية ظاهرة موضوعية نفسه: هل سيكون الدليل التجريبي الموجود الآن ممكنًا لو أن تلك الرؤية كانت صحيحة؟ اعتمادًا فقط على حقيقة أننا نتصور أن انسياب الزمن ليس حجة علمية، خصوصًا إذا كانت فكرة الصيرورة الموضوعية تناقض الدليل التجريبي. الأكثر من ذلك، كما سنرى في القسم القادم، الإحساس بأن الزمن ينساب قد يتضح أنه ظاهرة معتمدة على العقل.

إن كلمات تغير، ومرور، وصيرورة الزمان لها معانيها التقليدية فقط في كون ثلاثي الأبعاد. الجسم ثلاثي الأبعاد (الذي يحتفظ بهويته مع الزمن كجسم ثلاثي الأبعاد) هو الوحيد الذي يمكن أن يخضع لتغير موضوعي بمعنى أنه الجسم ثلاثي الأبعاد نفسه هو الذي يتغير. في كون مينكوفسكي، لا يوجد تغير لأن التاريخ الزمني بأكمله لجسم ثلاثي الأبعاد يُعطى بالكامل كأنبوب كوني رباعي الأبعاد للجسم. كما رأينا في الفصل الرابع وفي بداية الفصل الخامس، الأنبوب الكوني المتآلف للجسم نتصوره على أنه "يتكون" من أجسام مختلفة ثلاثية الأبعاد عند لحظات مختلفة من تاريخ الجسم، هي في الواقع مقاطع عرضية مختلفة ثلاثية الأبعاد للأنبوب الكوني للجسم الذي ينعكس منه الضوء قبل أن يصل إلى أعيننا. ما يجعل الجسم هو الجسم نفسه هي حقيقة أن أنبوبه الكوني يحتفظ بهويته كجسم رباعي الأبعاد في الزمكان.

إن المناطق المختلفة لأنبوب الجسم الكوني تكون مختلفة، ولكن لا يمكن اعتبار ذلك بمثابة قياس نسبوي لمفهوم التغير العادي. والسبب هو أن التغير الحقيقي، وهو مظهر لصيرورة موضوعية (موضوعية تخرج إلى الوجود)، يعني تغير الجسم ثلاثي الأبعاد نفسها، الذي لم يوجد مستقبله بعد. ولكن لا يوجد في الزمكان أجسام ثلاثية الأبعاد. والتغير في أنبوب زمني ما هو نوع مختلف تمامًا من التغير، إنه نوع التغير نفسه الذي نجده عندما ننظر إلى مناطق مختلفة من الأجسام الممتدة ثلاثية الأبعاد (كقلم، مثلاً). حقيقة أن الأجسام ثلاثية الأبعاد تمتد في الفضاء، بينما تمتد أنابيب الأجسام الكونية في الزمن ليست ذات صلة، لأنه في الزمكان، تكون الأبعاد المكانية والزمانية موجودة بالتساوي. تخبرنا بصمة الزمكان ---+ (أو +++-) أن طبيعة الأبعاد المكانية والزمانية مختلفة، ولكن هذا لا يعني أن البعد الرابع (الزمني) لا يوجد مثلما توجد الأبعاد المكانية. لو لم يُعطَ البعد الزمني بالكامل مثل الأبعاد المكانية، لما كان كون مينكوفسكي رباعي الأبعاد.

وبما أن كلا من الآنيّة ونسختها المنسبنة تناقضان الدليل التجريبي، ولأن الأخيرة تؤيد النسبية، فيبدو أن بديلاً واحدًا فقط لرؤية مينكوفسكي يبقى ممكنًا – رؤية الكون الكتلي المتنامي (أو المتطور) التي اقترحها برود [٧٨] في العشرينيات. تحاول هذه الرؤية، التي تنظر إلى الكون ليس كليًا ولكن جزئيًا فقط على أنه كتلة (تحتوي على الماضي والحاضر)، أن توفر الأساس لرؤية الصيرورة الزمانية كسمة موضوعية للكون، وفي الوقت نفسه تتحاشى التناقض المباشر مع النسبية. حديثًا، قام إليس، وكريست، وسوركين [٧٩، ٨٠، ٨١، ٨٢] بتقديم تصورات لفكرة برود عن الكون الكتْلي المتنامي. حيث إن البُعْديّة الثلاثية (الآنيّة) لم يعد من الممكن الدفاع عنها بعد الآن، فإن الفرصة الأخيرة لكل من يعارض كون مينكوفسكي المطلق رباعي الأبعاد هي محاولة الحفاظ على الأقل بالرؤية التي صاغها سوركين، بأن "نظرية النسبية لا تقتضي ضمنًا أن يكون المستقبل موجودًا بالفعل" [٨٢].

تزعم التصورات المعاصرة للكون الكتْلي المتنامي (ما عدا إيليس) أنها لا تسمح بأي شكل ذي بنية مفضلة. ولكني لا أعلم كيف يمكن تأييد هذا الادعاء إذا كان من المفترض صراحة أن وجود الأجسام الفيزيائية مطلق.(*) يشكل السطح الفوقي(**) (مهما يبلغ شكله من تعقيد) على حافة الكون المتنامي، حيث تحدث الولادة (أو الخروج إلى الوجود) للأحداث، سطحًا فوقيًا متميزًا موضوعيًا (وجود مطلق!)، وبالتالي إطار إسناد متميز موضوعيًا. عندئذ يتأكد أن نموذج الكون الكتْلي المتنامي أيضًا يناقض النسبية.

أحيانًا يكون من المغري التفكير في أن وجود أسطح فوقية متميزة موضوعيًا لا يسبب أي مشاكل للنسبية، لأن الأسطح الفوقية تلك موجودة في علم الكونيات النموذجي. وعلى الرغم من ذلك، فإن تلك الأسطح الفوقية هي ببساطة وصف مستساغ ولا يمكن تفسيرها على أنها تعني أن هناك سطحًا فوقيًا مفضلاً، وبالتالي إطار إسناد مفضلاً يكون موجودًا في الكون الواقعي. مثلاً، الإطار الذي تكون فيه إشعاعات الخلفية الميكروموجية الكونية متماثلة اتجاهيًا يُقال إنه 'مُفَضّل'، ويُعَرّف ذلك السطح الفوقي. ولكن هذا لا يقتضي ضمنًا أن يكون سطحًا فوقيًا مُفَضّلاً من منطلق معنى الوجود – بأن فئة وحيدة من الأحداث موجودة ويمكن تحديدها إما بالحاضر أو بالسطح الفوقي لحافة كون كتْلي متنامٍ. إن الإطار الساكن لإشعاعات الخلفية الميكروموجية الكونية هو مجرد "متوسط إطار السكون لمادة في الزمن الذي عنده أصبح الكون شفافًا للفوتونات" [٨٤].

(*) لتجنب إدخالاً لا مفر منه لإطار مرجعي مُفَضّل بواسطة الكون الكتْلي المتنامي، أصر كريستيان في ورقته البحثية [٨١] على أن الوجود ينبغي أن ينسبن. لكن معظم الحجج المعارضة لنسبنة الوجود، والتي نوقشت في هذا الفصل وفي الفصل الخامس، سوف تظل سارية بالنسبة للكون الكتْلي المتنامي أيضًا، كما سنرى أدناه.

(**) السطح الفوقي hypersurface تعميم للسطح في الفضاء الكوني [المترجم]

إذا نُظر للوجود على أنه مطلق، فإن الكون الكتْلي المتنامي سوف يُدخِل لا محالة، خلال السطح الفوقي الذي تخرج منه الأحداث إلى الوجود، إطارًا مُفَضّلاً وزمنًا مطلقًا،(*) لأن السطح الفوقي الناشئ يُجمل انسياب زمن موضوعي وبالتالي مطلق. لقد رأينا أن نسبنة وجود كون ثلاثي الأبعاد تناقض الدليل التجريبي النسبوي لأن مفارقة التوأم، مثلاً، كانت ستصبح مستحيلة لو تواجد التوأمان فقط عند لحظتهم الحاضرة كجسمين ثلاثيي الأبعاد. ولكن هذه الحجة لا تصلح في حالة الكون الكتْلي المتنامي، على الرغم من أن هذه الرؤية لديها الكثير من التفسير لتفعله بدلالة ما يوجد بالنسبة لكل من التوأمين قبل أن يلتقيا.

من ناحية أخرى، إحدى الحجج المعارضة لنسبنة الوجود – أي ما هو موجود بالنسبة لمراقب متسارع – تطبق بالكامل في الكون الكتْلي المتنامي. افترض أن الخطين في شكل ٥,١٣، اللذان كانا يرمزان إلى حاضر مراقب متسارع عند الحدثين P وQ، يُمثلان الآن السطح الفوقي الناشيئ لمراقب عند هذين الحدثين. الحجة هي الحجة – الحدثان، الواقعان في منطقة الزمكان المحددة بالقطع الناقص المُقطّع، تكون ماضيًا عند الحدث P، ولكنها تصبح مستقبلاً عند الحدث اللاحق O. كذلك تسري حجة اصطلاحية التزامن للكون الكتْلي المتنامي. افترض أن زمني الحاضر المناظرين لاختيارين مختلفين من ε، كما هو موضح في شكل ٦,٢، يمثلان السطح الفوقي الناشيئ لهذين

(*) واضح أنه ينبغي على مؤيدي الكون الكتْلي المتنامي أن يجيبوا على سؤال" لماذا تكون هذه الرؤية أفضل من مدخل لورنتز، الذي اعتمد هو أيضًا على وجود إطار مُفَضّل وزمن مطلق؟

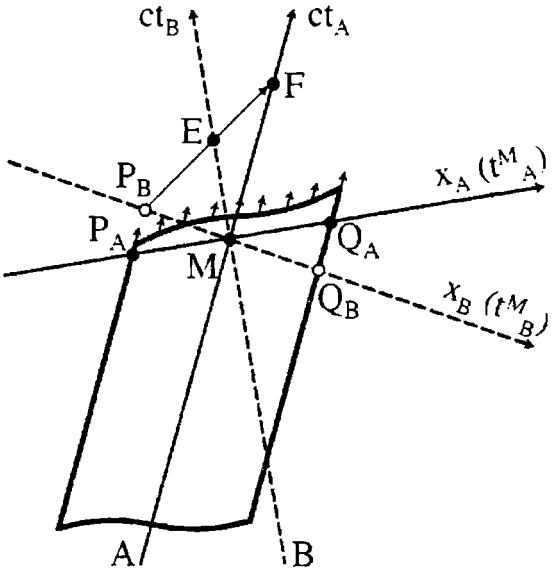
الاختيارين المختلفين من ε. إذا قد تكون اصطلاحية التزامن عديمة الأهمية، لأنها ستعني أن الموجود – على الأقل الجزء من الكون الكتْلـي المتنـامي، الذي يقع خارج المخروط الضوئي في شكل ٦,٢ – سيكون مسألة اصطلاح. في الواقع، وجود الكون الكتْلي الكامل أضحى معتمدًا على اختياراتنا من ε، لأننا نستطيع اعتبار مخروط ضوئي عند حدث شبه فضائي بعيد بحيث يقـع النصفان الماضي والمستقبل للمخروط الضوئي الأول في منطقـة الزمكـان خارج المخروط الضوئي الثاني. بهذه الطريقة، يكون وجود الزمكان بالكامل مسألة اصطلاح، وليس فقط منطقة الزمكان خارج المخروط الضوئي الثاني.

على الرغم من تلك الحجج ضد الكون الكتْلي المتنامي، ربما يعتـرض شخص على أن ما يهم في النهاية هو ما إذا كانت هذه الرؤية تناقض الـدليل التجريبي. ومع أن كون مينكوفسكي المطلق رباعي الأبعاد والكـون الكتْلـي المتنامي مختلفان جذريًا، فإنه ليس من الواضح مباشرة كيفية وضع تجربـة يمكنها أن تميز بين هذين التمثيلين للكون. اعتبر كمثال تجربة لتقلّص الطول لكي نرى ما إذا كان بالإمكان استخدامها لتوضيح أن الكون الكتْلي المتنـامي يفشل في تفسير الدليل التجريبي النسبوي. مراقبان A وB في حالـة حركـة نسبية وعصا مترية، ممثلة بأنبوبها الكوني في شـكل ٦,٣، تكـون سـاكنة بالنسبة إلى A. يقيس المراقبان طول العصا المترية عـن طريـق تـصوير نقطتي طرفيها لحظيًا في إطاريهما المرجعي. يـستعمل المراقـب A آلتـي تصوير موضوعتين عند 1 cm من نقطتي الطرفين P وQ للعـصا المتريـة، التي تكون موجهة على طول خط حركة A وB النسبية. يـضع المراقـب B آلتي تصوير عند 1 cm من خط حركة العصا المترية؛ لذا فـإن الإشـارتين الضوئيتين المنعكستين من نقطتي نهايتي العصا المترية تقطعـان 1 cm فـي

اتجاه متعامد مع العصا المترية قبل الدخول في آلتي تصوير B. يصور A وB نقطتي طرفي العصا المترية لحظيًا في إطاريهما المرجعيّ عند حدث اللقاء M. إذًا عند M، يصور المراقب A العصا المترية ثلاثية الأبعاد P_AQ_A، بينما يصور B مقطعًا عرضيًا مختلفًا ثلاثي الأبعاد من الأنبوب الكوني للعصا المترية، وهو P_BQ_B.

افترض الآن أن السطح الفوقي الناشيئ للكون الكتْلي المتنامي قد تجاوز لتوه عصا A المترية P_AQ_A وتقريبًا ثلاثة أرباع مقطع B العرضي ثلاثي الأبعاد لأنبوب العصا المترية الكوني. هذا يعني أن العصا المترية ثلاثية الأبعاد التي صوّرها B لن تكون موجودة بالكامل بالنسبة له عند حدث اللقاء M. ولكن يبدو أنه لا يمكن اختبار هذا عمليًا. أعتقد أن العقبة واضحة – عندما تصل إشارة ضوئية منعكسة بواسطة نقطة النهاية الخلفية للعصا المترية P_B المصورة بواسطة B إلى B عند الحدث E (فيتمكن B من رؤيتها)، يكون الحدث P_B قد خرج بالفعل إلى الوجود، لأن السطح الفوقي الناشيئ كان قد تقدم نحو E. عندما يرى A الحدث P_B عند F، يكون السطح الفوقي الناشيء قد وصل إلى E.

ما أعتبرها الآن الحجة الأقوى ضد الكون الكتْلي المتنامي هي أي تجربة من نوع تجارب آينشتين – بودلسكي – روسين – بيل. تخيل أن الحدث P_B في شكل ٦,٣ هو قياس استقطاب الفوتون في إطار B المرجعي. يعين هذا القياس استقطاب الفوتون الآخر للزوج المتشابك عند الحدث Q_B. إذًا لو كان الكون الكتْلي المتنامي هو التمثيل الصحيح للكون وكان السطح الفوقي الناشيء لم يصل بعد إلى الحدث P_B كما هو مبين في شكل ٦,٣، لحدد بسبب ذلك الحدث المستقبلي P_B غير الموجود نتيجة الحدث الماضي Q_B. مفارقة كتلك لا تظهر في كون رباعي الأبعاد، لأن جميع الأحداث تكون واقعية هناك.



شكل ٦,٣ يتنامى الأنبوب الكوني لعصا مترية ساكنة بالنسبة إلى المراقب A، كما هو مبين بواسطة الأسهم الصغيرة، في كون كتْلي متنامٍ. المراقبان A وB في حالة حركة نسبية يجريان قياسين لحظيين لطول العصا المترية عن طريق أخذ لقطتين متزامنتين (في إطارهما) لنقطتي طرفيها P وQ. آلتا التصوير في إطار A موضوعتان عند 1 cm من P وQ. في إطار B توضع آلتا التصوير على طول مسار العصا المترية، لذا فإن الضوء المنعكس من نقطتي نهايتيها بالتزامن في إطار B يسافر 1 cm إلى آلتي التصوير في اتجاه عمودي على حركة الإطارين النسبية التي على طولها وضعت العصا المترية. يأخذ A وB اللقطتين المتزامنتين في إطاريهما عند لحظة اللقاء M. لو كان الكون كتْليًا متناميًا لما وجدت نقطة الطرف الخلفي للعصا المترية P المصورة بواسطة B (الحدث P_B) عند M بالنسبة إلى B. ولكن عندما يرى كل من B عند الحدث E وA عند الحدث F الحدث P_B، يكون قد خرج بالفعل إلى الوجود، السطح الفوقي الناشئ كان قد تقدم نحو E وF، على التوالي.

أظن أن الحجج المعارضة للكون الكتْلي المتنامي توضح أنه من النادر جدًا أن تصبح تلك الرؤية تمثيلاً كافيًا للكون. من ناحية أخرى، اعتمدت جميع الحجج المعارضة لرؤية رباعية الأبعاد على الحقيقة المتفردة التي تقضي بأننا نكون على دراية بأنفسنا والكون فقط عند لحظة "الآن" المتغيرة بانتظام. ولكن هذه الحقيقة، كما رأينا في الفصل الثالث، لها تفسيران منطقيان محتملان، أحدهما يتسق تمامًا مع رؤية مينكوفسكي. لهذا تكون الرؤية رباعية الأبعاد هي المرشحة الأكثر جدية لتمثيل الكون بصورة صحيحة. وبما أن التواريخ الكاملة لجميع الأجسام ثلاثية الأبعاد تعطى كاملة في كون رباعي الأبعاد، فإن هذا يوضح أن كل شيء يكون موجودًا هناك – فلا يوجد ما يسمى الخروج إلى الوجود. لهذا لا يوجد تغير، ومرور، وصيرورة زمانية في كون رباعي الأبعاد.

٦,٣ تدفق الزمن والوعي

لا تخلط بين اللغة والواقع. اللغة البشرية أفضل كثيرًا في التقاط الخبرة البشرية منها في التعبير عن القوانين الفيزيائية العميقة.

ب. جرين [٩٠]

إن مفهوم انسياب الزمن يحمل معنيين مختلفين تمامًا في الكونين ثلاثي الأبعاد ورباعي الأبعاد. في كون ثلاثي الأبعاد، يكون لدينا انسياب الزمن الموضوعي العادي والعالمي – تنقسم الأحداث بموضوعية إلى ماضي، وحاضر (يقع بالتزامن عند لحظة 'الآن')، ومستقبل. في كون مينكوفسكي، تكون جميع الأحداث متساوية الوجود وبالتالي لا تكون منقسمة موضوعيًا إلى ماضي، وحاضر، ومستقبل.

بعد التحقق من أن الآنيّة في تناقض لا يمكن التغلب عليه مع الدليل التجريبي النسبوي، يحاول النموذج الكوني للكون الكتْلي المتنامي الذي تم إحياؤه مؤخرًا، كما رأينا في القسم السابق، إيجاد آلية موضوعية أخرى للصيرورة الزمانية وبالتالي لانسياب الزمن. يبدو أن سبب المحاولات المستمرة لاكتشاف ذلك المثيل الموضوعي لإحساسنا بأن الزمن ينساب هو الاعتقاد الذي يتشارك فيه العديد من العلماء والفلاسفة بأن درايتنا بأنفسنا والكون تكون فقط عند لحظة 'الآن' المتغيرة بانتظام وينبغي أن تعكس حقيقة موضوعية. لا يوجد ما يعيب هذا الاعتقاد طالما أنه لا يؤخذ كأمر مسلم به جدلاً. ومع ذلك فهي تعكس أحد التفسيرين الرئيسين لما نتصوره – إحساسنا بأن الزمن ينساب يكون إما بسبب انسياب موضوعي للزمن أو بسبب طريقتنا الخاصة لتصور الكون (نصبح بالتعاقب على دراية بالانعكسات ثلاثية الأبعاد من الأجسام الفيزيائية).

على ذلك، في بعض الحالات [٨٠، ص ٦١] تم أخذ ذلك الاعتقاد على محمل الجد، لأنه نُظر إلى حقيقة أننا نكون على دراية بأنفسنا والكون فقط في اللحظة الحاضرة على أنها جزء من الدليل التجريبي الذي ينبغي اعتباره عندما نحاول الوصول لفهم مضبوط للكون. أظن أن ذلك المدخل يسلم جدلاً بإحدى الإجابتين المحتملتين للسؤال الجوهري الذي كنا نحاول الإجابة عنه في إطار النسبية: هل يعكس إحساسنا بانسياب الزمن حقيقة موضوعية؟

بالنظر لجميع الحجج المؤيدة للرؤية رباعية الأبعاد، دعنا نرى ما إذا كان الشعور بأن الزمن ينساب متوافق مع تلك الرؤية. غالبًا ما يقال إنه لا يوجد 'آنية' عالمية في الزمكان. بل إن الوضع في الواقع يكون أسوأ بالنسبة لأنصار الرأي القائل بأن الوقت ينساب موضوعيا – الوجود المتساوي لأحداث الزمكان يعني أنه لا يوجد 'آنية' محلية أيضًا. في رؤية انسياب

الزمن الموضوعي، تكون لحظة الحاضر متميزة (لحظة الزمن الوحيدة التي تكون موجودة)، بينما في الزمكان، تكون جميع أحداث الأنبوب الكوني لجسيم متساوية الوجود، وبالتالي لا يوجد حدث متميز بأنه 'الآن' للجسيم. في كون رباعي الأبعاد كهذا، يبدو أن المفهوم الوحيد لانسياب الزمن الذي يكون له معنى هو الذي وصفه فايل Weyl [١]:

الكون الموضوعي هو ببساطة، الذي لا يحدث. فقط بالنسبة لنظرة وعيي، وأنا أحبو صاعدًا على طول خط الحياة لجسدي، يخرج بالفعل مقطع محدد من الكون إلى الحياة كصورة عابرة في الفضاء تتغير باستمرار مع الزمن.

كانت صياغة مينكوفسكي رباعية الأبعاد للنسبية الخاصة هي التي أشارت أول مرة إلى أن هناك حاجة لاستخدام مفهوم الوعي لتفسير نظرية فيزيائية. لم تكن تحتاج الصياغة الأصلية ثلاثية الأبعاد للنسبية الخاصة لآينشتين في عام ١٩٠٥ بحاجة إلى مفهوم الوعي لتفسيرها. توضح هذه الحقيقة أن مسألة بُعْدِيَّة الكون لها علاقة بقضية الوعي.

قد يعترض شخص على أن الرؤية رباعية الأبعاد لا تحتاج إلى مفهوم الوعي، لأننا نستطيع الحصول على جميع نتائج نظرية النسبية بدونه. صحيح أن النسبية ذاتها كنظرية فيزيائية لا تحتاج إلى هذا المفهوم. وعلى الرغم من ذلك، فإن النسبية الخاصة تخبرنا بشيء مربك للغاية عن الكون، ولا يجب علينا فقط إثبات رؤية البُعْدِيَّة الرباعية، ولكن أن نكون أيضًا جاهزين للتوفيق بين أجزاء المعرفة الموثوق بها والمستنتجة من معلومات إدراكنا الحسي بهذه الرؤية، وذلك إذا كان الكون بالفعل رباعي الأبعاد. إن ذلك الجزء الموثوق به من المعرفة بالإدراك الحسي هو شيء لا يشكك فيه أحد – يعني أننا نكون على دراية بأنفسنا والكون عند لحظة 'الآن' المتغيرة بانتظام. لم يتمكن أحد،

حتى الآن، من إيجاد طريقة، لا تشمل وعينا، للتوفيق بين الرؤية البُعْدِيَّة الرباعية وحقيقة أن كل ما ندركه يحدث فقط في الوقت الحاضر. يبدو أن هذا يوضح أن اقتراح فايل Weyl يحمل أعظم وعد لحل التناقض الصعب ظاهريًا عليه بين النسبية وخبرتنا.

إن وجهة نظر فايل مهمة بشكل خاص في توضيح أن هؤلاء الذين يعتبرون رؤية البُعْدِيَّة الرباعية خاطئة بشكل واضح يقفون على أرضية مهتزة. افترض، للتفسير، أن الكون بالفعل كما وصفه وايل. قد يحبو وعيك صاعدًا على طول الأنبوب الكوني لجسدك ويقرأ المعلومات القادمة من حواسك والمختزنة في عقلك، ولكنه قد يفسر هذه المعلومات على نحو خاطيء بمعنى أن الكون ثلاثي الأبعاد موجود ويتغير بانتظام مع الزمن. قد تكون مقتنعًا بالكامل أنك كنت تعيش في كون ثلاثي الأبعاد يتطور مع الزمن. عندئذ، إذا قرأت ورقة بحثية بواسطة بعض العلماء الذين جادلوا في أن الكون الخارجي رباعي الأبعاد، فمن المرجح أنك قد تكون متسرعًا لتصرح بأن تلك الرؤية هراء تمامًا. ربما لا تكون هناك أي طريقة لكي تكتشف أن الكون الواقعي ليس ثلاثي الأبعاد وذلك إذا كنت تبني رؤيتك الكونية ومذاهبك الفلسفية على أساس المعلومات الواردة أساسا من حواسك، والتي تقودك إلى الاعتقاد بأن الكون بأكمله موجود فقط عند اللحظة الحاضرة لأنك على دراية بنفسك وبالكون عند هذه اللحظة فقط. كيف نعلم أننا لسنا في الموقف نفسه؟

عرّف فايل الوعي ضمناً على أنه كيان 'متحرك' على طول الأنابيب الكونية لأجسادنا، وهو الذي يجعلنا على دراية بأنفسنا وبالكون الخارجي عند لحظة معينة. مع الأسف، لم تلق فكرة وايل، على الرغم من أنه كثيرًا ما يُستشهد بها، الاهتمام الذي تستحقه في ضوء المشكلات الصعبة التي واجهتها رؤية

الانسياب الموضوعي للزمن. وبما أن رؤية انسياب الزمن موضوعيًا وعالميًا تبدو أنها محكوم عليها بالفشل، فإن الرؤية البديلة – بأن انسياب الزمن معتمد على العقل(*) – التي وضعها فايل كان ينبغي لها أن تُفحص بدقة أكثر. لكي نفهم الحاجة لمثل هذه الدراسة، دعنا نناقش بإيجاز تضمينات فكرة فايل.

تبدو هذه الفكرة من الوهلة الأولى أنها متناقضة مع نفسها، لأن فايل افترض أن الوعي (تاركًا سؤال ما الوعي في حد ذاته جانبًا) يتحرك في زمكان مينكوفسكي حيث لا تكون الحركة ممكنة. ينبغي لهذا التناقض أن يُفحص بعناية لتحديد ما إذا كان ظاهريًا أم واقعيًا، لأنه ربما تكون حدسية فايل هي السبيل الوحيد لتفسير إحساسنا بانسياب الزمن، وذلك إذا ما اتضح أن الواقع هو كون ساكن رباعي الأبعاد. في الحقيقة، سوف يكون هناك تناقض مباشر فقط لو افتُرض أن الوعي 'يعمل' على المستوى الماكروي للكون الممثل بزمكان مينكوفسكي. ولكن من الواضح أن هذا ليس هو الحال – لم يرَ أحد الوعي يمشي في الشارع.

ينظر علم الأعصاب الحديث إلى الوعي على أنه مظهر لعمليات العقل تخضع في النهاية لقوانين الفيزياء. إذا كان الفهم الحالي صحيح في الأساس، فإن الوعي يكون جزءًا من الكون الفيزيائي الذي تكون ساحته الأساسية هي الزمكان، وبالتالي لا يمكن للوعي أن يتحرك في هذا الكون المتجمد. في هذا الموقف ينبغي علينا إما التشكيك في رؤية البُعْدِيَّة الرباعية أو السؤال عن مدى الاكتمال الفعلي لفهمنا الحالي عن الوعي. من ناحية، الحجج المؤيدة لرؤية مينكوفسكي، كما رأينا، غالبة. ومن ناحية أخرى، هناك إجماع بين العلماء على أن علم الأعصاب لا يفهم الوعي تماما.

(*) الصلة بين انسياب الزمن والوعي – أو بالأحرى بين الزمن والروح – نوقشت بواسطة أرسطو [٩٣] والقديس أوجستين [٩٤].

لهذا بدلاً من الانتظار لعقود أو ربما حتى لقرون إلى أن يكشف علم الأعصاب عن طبيعة الوعي، دعنا نرى ما يمكن أن يكون عليه لكي يتضح أن حدسية فايل صحيحة، مما يعني أن الوعي كان من الممكن أن يتحرك في الزمكان. يبدو أن هناك تفسيرين ممكنين للوعي – الازدواجي والمادي – لا يؤديان إلى تناقض إذا تنقل الوعي في الزمكان. لا أظن أن أيًا من تفسيري الوعي هذين قد يبدو جذابًا بالنسبة للعلماء والفلاسفة المعنيين بدراسات الوعي. بل إن الخيار الازدواجي ربما ينظر له على أنه غير علمي. إني أجد مثل هذا الموقف لوضع المسميات بالغ الخطورة. عندما تكون المخاطر على أعلى مستوى ممكن – وهو رؤيتنا للنسبية – لا ينبغي أخذ أي شيء كأمر مسلم به. جميع الخيارات، حتى المنطقية البحتة منها، ينبغي أن تكون على مائدة البحث. لا يوجد ما نخسره لو أخذنا في الاعتبار جميع الأفكار الممكنة، ولكن قد نخسر كثيرًا إذا لم نفعل ذلك.

في الرؤية الازدواجية، لا يكون الوعي كيانًا فيزيائيًا، وبالتالي لا يتبع القوانين النسبوية أو أي قوانين فيزيائية أخرى. ما يثير الاهتمام في هذا التفسير لحدسية فايل هو أن الحجج المعتادة المعارضة للرؤية الازدواجية الفلسفية لا تسري في هذه الحالة. طبقًا لتلك الحجج، لو كان الوعي والعقل غير ماديين (فيزيائيين)، فكيف سيتمكن الجسد من التآثر مع العقل وكيف سيتمكن العقل من إخبار الجسد بما يفعله؟ في رؤية فايل لا يوجد تآثر فيزيائي بين الوعي والأنبوب الكوني للجسد. يقرأ الوعي ببساطة المعلومات المخزونة في العقل، وهذا هو 'التآثر' الوحيد الذي يتدخل فيه الوعي. لا يؤثر الأنبوب الكوني للجسد على الوعي ولا يؤثر الوعي في الأنبوب الكوني بأي طريقة.

وطبقًا للتفسير المادي للوعي في إطار فكرة فاين، فإن الوعي قد 'يعمل' على مستوى يمكن أن تكون بُعديته مختلفة عن أربعة، مما قد يعني أن كون مينكوفسكي لا يمكن تطبيقه على كل مستويات الواقعية [٩٥].

وبالفعل لا يبدو واقعيًا أن يكون توقع أي مفهوم ماكروي (مثل زمكان مينكوفسكي) قابلاً للتطبيق على جميع مقاييس ما هو موجود. عند مستوى ما يقع 'تحت' المستوى الماكروي لخبرتنا اليومية، ستكون خواص الكون حتمًا مختلفة تمامًا عما نعلمه من خبرتنا الماكروية؛ لقد بدأنا بالفعل ملاحظة تلك التعارضات على المستوى الكمومي. مع وضع هذا في الاعتبار، لا يكون من غير المتصور تمامًا توقع أن 'يعمل' الوعي عند مستوى تحت ماكروي حيث لا يسري تجمد الكون الماكروي والكمومي(*) المستنتج من النسبية بعد الآن.

لتوضيح نتائج فكرة فايل الأكثر إثارة للجدل، تخيل أنك تركز على كيفية درايتك بنفسك. إنك على دراية بجسدك فقط عند لحظة واحدة متغيرة بانتظام نسميها بلحظة 'الآن'. طبقًا لفايل، يكون سبب هذا هو أن وعينا يحبو صاعدًا على طول الأنبوب الكوني لجسدنا، وهو على دراية في كل وقت بمنطقة صغيرة فقط من الأنبوب الكوني. نتيجة لذلك يكون الكيان الذي لا نعلم عنه أي شيء تقريبًا – الوعي – إلى حد ما غير معتمد على جسدنا، لأن جسدينا الماضي والمستقبلي يتواجدان كمجرد جسدين – لا وجود لوعينا هناك. يتمركز الوعي دائمًا في مساحة بالغة الصغر من أنبوبنا الكوني الذي نتصوره على أنه جسدنا الحاضر (الفترة الزمنية لتلك المساحة، أيْ فترة 'الآن' الزمنية، لا تزال غير معلومة). لا يمكننا افتراض أن وعينا يكون منتشرًا على طول أنبوب جسدنا الكوني بالكامل، لأن ذلك الافتراض يؤدي إلى تناقض واضح مع الحقيقة المأخوذة من خبرتنا اليومية – بأننا نكون على دراية بأنفسنا فقط عند لحظة 'الآن'. لو كانت جميع أجسادنا – الماضي

(*) كما سنرى في الفصل العاشر، ينبغي أن يكون الكون الكمومي رباعي الأبعاد أيضًا، على الرغم من حقيقة أن النسبية لا يمكن تطبيقها هناك بشكل كامل، بالمعنى الموضح في ذلك الفصل.

والحاضر والمستقبلي – تمتلك الوعي، لكانت عندئذ حياتنا مختلفة إلى حد كبير: لكنا أصبحنا على دراية بأنفسنا والكون عند جميع لحظات حياتنا ولما كان هناك انسياب للزمن؛ أي لكنا في حالة سرمدية أشبه بالخلود.(*)

لذا فإنه من منظور البُعْدِيَّة الرباعية، 'يتحرك' وعينا بالفعل نحو الجزء المستقبلي لأنبوب جسدنا الكوني، تاركًا أجسادنا الماضية وهي عديمة الوعي و'مانحًا الحياة' لأجسادنا المستقبلية عديمة الوعي أيضًا. السؤال الطبيعي الذي ينتج على الفور من رؤية فايل هو: ماذا يحدث للوعي عندما يصل إلى نهاية الأنبوب الكوني لجسد شخص ما؟ مع الأسف، لا يمكن الإجابة على هذا السؤال استنادًا للحقيقتين اللتين قادتا فايل لرؤية انسياب الزمن المعتمد على العقل – وهما (١) أن النسبية الخاصة تصف الكون على أنه رباعي الأبعاد (٢) وأننا نكون على دراية بأنفسنا وبالكون عند لحظة الحاضر.

نحن الآن في وضع يسمح بأن نكمل تفسير مفارقة التوأم الموضحة بالرسم في شكل ٥,١١ أ. يكون التوأمان موجودين عند جميع أحداث أنبوبهيما الكونيين، ولكن كل منهما يكون على دراية فقط بنفسه عند حدث وحيد عندما يصل إليه وعيه ويصبح على دراية بذلك الحدث. لا ينبغي أن يكون هناك أي فرق في انسياب الزمن المعتمد على العقل للتوأمين (تقدم وعي كل منهما على طول أنبوبه الكوني)؛ على الأقل لا يوجد سبب ماكروي، كما رأينا أعلاه، يمكنه أن يسبب أي تغير في انسياب الزمن لأحد التوأمين. إذًا عندما تكون قد مرت خمس سنوات بالنسبة للتوأم B ليصل وعيه إلى حدث اللقاء M، سوف يكون سعيدًا بلقاء أخيه. لكن سيكون هذا لقاءً

(*) آثرنا هذا التعبير مقابلاً لعبارة المؤلف " we would be in an eternal God-like state" خشية أن يساء فهمها في ثقافتنا الدينية [المترجم]

غريبًا جدًا – فسوف يتقابل التوأم B مع أخيه من مستقبل أخيه. ولأن وعي التوأم A يتحرك الطريقة نفسها مثل وعي B، فإن خمس سنوات ستكون قد انقضت بالنسبة إلى A أيضًا، ويصبح وعيه على دراية بالحدث I؛ لذا فإن وعيه يكون متخلفًا عن وعي B بخمس سنوات. عندما يصبح التوأم A على دراية بالحدث M، سوف يتقابل مع أخيه من ماضي أخيه؛ وسيكون وعي B متقدمًا بخمس سنوات.

هذا التفسير المثير للجدل لمفارقة التوأم ينتج لا محالة من فكرة فايل. ولذلك التفسير تضمين ربما يكون أكثر إثارة للجدل – هل يمكن أن نكون متأكدين من أن بعض الأشخاص الذين نقابلهم ليسوا مجرد أجساد عديمة الوعي؟ ربما يكون القارئ قد أدرك بالفعل أنه بهذا السؤال قد دخلنا حقل فلسفة العقل، وبتحديد أكثر أثرنا قضية ما إذا كان هناك عقول أخرى.

يبدو أن فكرة فايل تؤدي إلى نتائج غير منطقية. ولكن على الرغم من ذلك، لا ينبغي تجاهلها من أجل هذا، وينبغي بالفعل فحصها بدقة، لأن وضع المسميات لم يكن أبدًا حلاً لأي شيء خاصة المشكلات العلمية.

٦,٤ الإرادة الحرة

لم تعد الأشياء تمامًا كما تبدو.

س. ريدجواي، كلمات أغنية "Camouflage"

في الرؤية الآنيّة، يكون المستقبل غير محدد أنطولوجيًا، مما يبدو أنه يعني أننا قد نمتلك الإرادة الحرة لنكون أسياد مصيرنا الخاص. إلا أنه في كون مينكوفسكي رباعي الأبعاد، لا توجد إرادة حرة، لأن التاريخ الكامل لكل جسم يُدرَك ويُعطى مرة واحدة وإلى الأبد على أنه أنبوب الجسم الكوني.

وبذلك، ربما تكون الإرادة الحرة موجودة فقط في كون ثلاثي الأبعاد تكون فيه أجسادنا ثلاثية الأبعاد موجودة فقط عند اللحظة الحاضرة ونبدو أننا أحرار في تحديد مستقبلنا.

إن أهمية مسألة طبيعة الزمكان واضحة تمامًا هنا أيضًا – فإن امتلاكنا للإرادة الحرة من عدمه يعتمد على بُعْدِيّة الكون. وبهذا فإن أي دراسة علمية للإرادة الحرة ينبغي أن تبدأ بالسؤال "ما بُعْدِيّة الكون؟" ومن ثم فإنني أظن أنه ينبغي أن يكون من الواضح أن أي مناظرة حول الإرادة الحرة لا تذكر حتى هذا السؤال تخاطر بأن تصبح لا شيء أكثر من مجرد برنامج حواري.

ربما يبدو الأمر صادمًا إذا كان الواقع كونًا رباعي الأبعاد، تكون فيه حياتنا محددة سلفًا بالكامل، حيث لا توجد لدينا إرادة حرة بالمفهوم الشائع – وهو أننا نحن الذين نخترع مستقبلنا الذي لا يكون موجودًا عندما نصنع قراراتنا. لا أظن أن أحدًا قد تعجبه هذه النتيجة المزعجة. لكن ما يهم حقًا في مثل تلك المواقف ليس ما نريده، وإنما ما تخبرنا به المعرفة العلمية الموثوقة، المستنتجة من الدليل التجريبي، عن الكون. مع الأسف، يتجاهل بعض الفيزيائيين والفلاسفة ببساطة حجج الوجود للزمكان بأكمله ويُسلِّمون بأن الواقع لا يمكن أن يكون الكون الساكن رباعي الأبعاد المستنتج من الدليل التجريبي المؤيد للنسبية. من العدل، فيما أظن، أن نسأل أي شخص يميل إلى تبني مثل هذا الموقف أن يعتبر المسألتين التاليتن:

- كما رأينا في الفصل الثالث، ما ندركه على أنه كون ثلاثي الأبعاد متغير بانتظام يكون له تفسيران محتملان منطقيًا: الصور ثلاثية الأبعاد التي نكون على دراية بها إما أنها تكون ناجمة عن كون خارجي ثلاثي الأبعاد أو أنها انعكاسات ثلاثية الأبعاد من كون متعدد الأبعاد. إذًا، كيف نكون متأكدين من أن التفسير الثاني ليس هو التفسير الصحيح؟ خاصة بعد حجة

مينكوفسكي في ورقته البحثية بعنوان *المكان والزمان*، والحجج الأخرى التي ظهرت على مدار المائة سنة الماضية، لاسيما الحجج التي توضح أن التأثيرات النسبوية كما نوقشت في الفصل الخامس قد تكون مستحيلة لو كان الكون ثلاثي الأبعاد.

• افترض أن جميع الحجج التي تؤيد فكرة البُعْدِيَّة الرباعية قد اتضح أنها صحيحة، وأن الحكم النهائي – الدليل التجريبي – قد صدر بالفعل لصالح هذه الرؤية. عندئذ ماذا كنا سنفعل؟ ننكر الدليل التجريبي ونستمر في محاولة إقحام الطبيعة وكبسها في آرائنا المسبقة؟

حتى لو لم تساعد هاتان المسألتان على منع حالات التجاهل العلني لحجج واقعية الزمكان، عندئذ بالطبع، يكون لدينا جميعًا الحق في وجهات نظرنا، ولكن علينا ألا ننسى أبدًا أن هناك مشكلة بسيطة – الطبيعة لا تكترث لآرائنا الشخصية.

من الناحية الأخرى، أي صدمة كرد فعل، نتيجة معرفة أن شعورنا بامتلاك الإرادة الحرة لا يعكس بصورة كافية الكون الخارجي، ربما تكون سابقة لأوانها قليلاً.(*) في الرؤية رباعية البُعْدِيَّة يبدو فعليًا أن كل شيء في الكون مختلف تمامًا، بما في ذلك قضية الإرادة الحرة.

(*) في كثير من الأحيان يكونُ رد فعل الناس عاطفيا جدا عندما يسمعون أن نظرية علمية ما تشكك في وجود الإرادة الحرة. عادة ما يقولون شيئًا مماثلاً لعبارة "لا يهمني ما يحاول العلم إخباري به. فأنا أعلم أنني أستطيع فعل أي شيء أقرر فعله الآن." أظن أن الاقتراح الجيد في مثل تلك الحالات هو تخيل مشاهدة فيلم قديم يقوم فيه البطل بإبداء رد فعل على قراءة أن النسبية تقتضي ضمنا عدم وجود الإرادة الحرة بالقول " لا يهمني ما تحاول إخباري به هذه النظرية الغريبة. فأنا أعلم أنني أستطيع فعل أي شيء أقرر فعله الآن." لا يسعنا إلا الابتسام على الثقة العمياء لشخصية البطل، لأننا نعلم أن ما يُعرض على الشاشة مسجل كله بالفعل على شريط الفيلم.

إذا اتضح أن حدسية فايل، بأن الوعي هو الذي يخترع إحساسنا بانسياب الزمن، هي التفسير الصائب لظاهرة انسياب الزمن، عندئذ لا يكون هناك تناقض بين الكون الساكن رباعي الأبعاد للنسبية وانطباعنا بأن الوعي هو الذي يقرر ما ينبغي أن تكون عليه أفعالنا المستقبلية. في رؤية فايل، 'يقرأ' وعينا فقط المعلومات عن أفعالنا التي تكون مخزونة في العقل عند لحظات متعاقبة من الزمن، ولكنه يترجم تلك الحقيقة بصورة خاطئة، بمعنى أن وعينا يسبب أفعالنا.

على الرغم من أن هذه ليست تفسيرًا للرؤية رباعية البُعْدِيَّة، فمن الجدير بالذكر، على مدار الخمس وعشرين سنة الماضية، أن الدليل التجريبي في علم الأعصاب يبدو أنه متسق تمامًا مع حدسية فايل بأن الوعي يصبح فقط على دراية بأفعالنا ولكنه لا يبدأها. في الثمانينيات أجرى بينجامين ليبيت Benjamin Libet تجارب [٩١] تقترح أن الوعي لا يبدأ الأفعال الإرادية، لأننا نصبح على علم بها بعد أن تبدأ بمائتي مللي ثانية بواسطة عمليات لاواعية في المخ. هناك تجارب حديثة منشورة في مجلة Nature لعلم الأعصاب في عام ٢٠٠٨ يبدو أنها تؤكد نتائج ليبيت وتوضح أن إدراكنا بأفعالنا يكون متأخرًا أكثر [٩٢]:

كان هناك جدل طويل حول ما إذا كانت القرارات 'الحرة' ذاتيًا يتم تحديدها بواسطة نشاط للمخ في وقت مبكر. وجدنا أن حصيلة قرار ما يمكنها أن تكون مرموزة في نشاط دماغي لقشرة الفص الجبهي والجداري قبل أن تدخل الوعي بفترة تصل إلى ١٠ ثوان.

إن الفحص بتفصيل أكثر لتأثير الرؤية رباعية البُعْدِيَّة على مفاهيم من قبيل الإرادة الحرة ومعنى الحياة يقع خارج إطار هذا الكتاب. وعلى الرغم من ذلك، فإن القضية التي نوقشت في هذا الفصل والفصول السابقة تمدنا بمعلومات كافية لتمكننا من عكس ما قد تعنيه حقًا الإرادة الحرة بعقل متفتح، وربما يساعدنا هذا على إدراك أنه، حتى لو اتضح أن الكون رباعي الأبعاد وأن أجسادنا لا تملك أي إرادة حرة، فليس بالضرورة أن تبدو الحياة بلا معنى.(*)

٦,٥ ملخص

تبين أن عددًا من القضايا الجوهرية مثل اصطلاحية التزامن، التغير، الصيرورة الزمانية، انسياب الزمن، الوعي، والإرادة الحرة تبدو أنها مختلفة تمامًا في الكونين ثلاثي الأبعاد ورباعي الأبعاد. وهذا يعني أن السؤال عن طبيعة الزمكان يسبق تلك القضايا، ولهذا يجب أن يُحل أولا.

(*) كتمرين آخر في التفكير الإبداعي والتحليلي، افترض أن الكون بالفعل رباعي الأبعاد. فمن المؤكد أننا كنا سنصبح مندهشين من اكتشاف أن كل شيء في ذلك الكون يبدو مختلفا تمامًا، وليس بالضرورة للأسوأ.

الجزء الثالث

تضمينات واقعية الزمكان للفيزياء

أهداف الجزء الثالث

الفكرة الأساسية هي عرض أساسيات النسبية من منظور مينكوفسكى، أى بدلالة هندسة الزمكان [...] لأنها تمثل بالنسبة لى (وربما لكثيرين غيرى) المفتاح الذى يساعد على تفسير ألغاز عديدة. وغاية ما أطمح إليه أن أجعل من الزمكان ورشة عمل حقيقية للفيزيائين، وليس مجرد متحف للزيارة بين الحين والحين يكتنفه شعور بالرهبة.

ج. ل. سينج [١٢٤، ص VII]

يهدف هذا الجزء إلى استكشاف تضمينات واقعية الزمكان والأنابيب الكونية للأجسام الفيزيائية بالنسبة لعلم الفيزياء ذاته.

رأينا في الجزء الأول من هذا الكتاب أن النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة تعتبر في حقيقة الأمر مظاهر دالّة على واقعية الزمكان. أمّا أولئك الذين يفترضون جدلا أن الكون ثلاثي الأبعاد، ويعتبرون أن زمكان مينكوفسكى ليس أكثر من حيِّز رياضى، فإنهم بلا شك سوف يهتدون سريعا إلى أن النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة يمكن التعبير عنها بلغة رباعية

الأبعاد؛ ولكن ذلك ليس الشيء الوحيد الممكن؛ فهذه التأثيرات المتوقعة من النسبية الخاصة قد صيغت في البداية بلغة الأبعاد الثلاثية العادية. وغالبا ما يزعم أنصار البُعْدِيَّة الثلاثية أنه من الخطأ اعتبار التأثيرات النسبوية بمثابة برهان على البُعْدِيَّة الرباعية للكون، نظرا لأنه بالإمكان وصفه بكلتا اللغتين ثلاثية الأبعاد ورباعية الأبعاد. مثل هذه المزاعم، لسوء الحظ، غير مبنية على تحليل دقيق للتأثيرات النسبوية ذاتها. وحقيقة أن هذه التأثيرات يمكن صياغتها بكلتا اللغتين غير مرتبطة بمسألة بُعْدِيَّة الكون –إذْ يمكن وصف كون ثلاثي الأبعاد بلغة ثنائية البعد أيضا، بشرط اعتبار الإحداثي الثالث كمعامل بالطريقة التى يعامل بها الزمن كمعامل عند القائلين بالبُعْدِيَّة الثلاثية فضلا عن ذلك، حتى إذا وافق المرء على أن النسبية الخاصة يمكن التعبير عنها بلغة ثلاثية الأبعاد أو رباعية الأبعاد على حد سواء، فإن النسبية العامة لا يمكن تمثيلها على نحو كاف بلغة البُعْدِيَّة الثلاثية .

وكما رأينا في الفصل الخامس، كان السؤال المتعلق بقضية بُعْدِيَّة الكون هو: هل النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة ممكنة إذا كان الكون والأجسام الفيزيائية في أبعاد ثلاثة؟ وأوضح التحليل في ذلك الفصل أن الإجابة على هذا السؤال سلبية، ومن ثم فإن التأثيرات النسبوية في الحقيقة عبارة عن مظاهر دالة على بُعْدِيَّة الكون الرباعية. لقد طورنا مجموعتين من المبررات المؤيدة لوجهة نظر البُعْدِيَّة الرباعية:

فى الفصل الرابع، أوضحنا أنه إذا كان الكون رباعي الأبعاد، فإن بُعديته الرابعة تُظهر دلائل إثباتها في التأثيرات المطابقة تماما للتأثيرات النسبوية.

فى الفصل الخامس، قدمنا ما يفسر أن التأثيرات النسبوية تكون مستحيلة إذا ما كان الكون ثلاثي الأبعاد.

ويبدو السؤال طبيعيا عما إذا كانت هناك براهين أخرى على البُعْدِيَّة الرباعية للكون بالإضافة إلى التأثيرات النسبوية المعروفة. من ناحية، هذه الإمكانية تبدو بعيدة المنال، نظرا لأن النسبية الخاصة أثبتت في النهاية أنها نظرية الكون رباعي الأبعاد الذى نعيش فيه، حسبما أوضح مينكوفسكى، ولهذا فإن كل المظاهر المؤيدة لبُعْدِيَّة الكون الرباعية توصف فعلا بواسطة نظرية النسبية الخاصة. لكن مينكوفسكى نفسه، من ناحية أخرى، بدا أنه قد توقع مظاهر تأييد أكثر لبُعْدِيَّة الزمكان الرباعية، فقد أدرك حقيقة أن الأجسام الفيزيائية عبارة عن خطوط كونية في الزمكان، وسبق غيره إلى القول [١١، ص ٧٦] بأن " القوانين الفيزيائية ربما تجد صياغتها بالغة الاتقان في صورة علاقات تبادلية بين هذه الخطوط الكونية". ولسوء الحظ لم يتم متابعة برنامج مينكوفسكى بدقة صارمة حتى الآن. ويعزى سبب ذلك إلى أن بُعْدِيَّة الكون الرباعية وواقعية الخطوط الكونية على وجه الخصوص لم تؤخذ بجدية كافية. ونتيجة لهذا، فإننا قد نفتقد الفرصة لحل بعض الأسئلة المفتوحة في الفيزياء.

اعتبر، كمثال، أصل القصور الذاتى، إنه يبدو مختلفاً في الكون ثلاثي الأبعاد عنه في الكون رباعي الأبعاد. ففى الكون ثلاثي الأبعاد يبقى القصور الذاتى على ما كان عليه طوال القرون – وهذه أحجية رائعة. أما في كون مينكوفسكى رباعي الأبعاد فإن الجسيمات العادية ثلاثية الأبعاد تكون أجسامًا رباعية الأبعاد – هى الأنابيب الكونية للجسيمات – ويمكننا أن نتبصر أصل القصور الذاتى إذا افترضنا أن الأنبوب الكونى لجسيم متسارع هو في الحقيقة جسم واقعي رباعي الأبعاد.

إذا تحرك جسيم بواسطة القصور الذاتى (دون أن يلقى مقاومة)، فإن أنبوبه الكونى يكون خطًا مستقيمًا في زمكان مينكوفسكى. وفى حالة جسيم متسارع يكون لدينا حقيقتان غير مرتبطتين إلى حد كبير:

- الجسيم يقاوم تسارعه.
- أنبوبه الكونى يكون مشوها.

إذا كان الأنبوب الكونى للجسيم جسما حقيقيا رباعي الأبعاد فإنه يكون من الطبيعى تماما افتراض أن الأنبوب الكونى المشوّه لجسيم متسارع يقاوم أيضا تشوهه، وتنشأ قوة استرداد ساكنة تحاول إعادة الأنبوب الكونى إلى حالته غير المشوهه (الجيوديسية)، وذلك مقارنة بحالة قضيب مشوّه ثلاثي الأبعاد. وتظهر قوة الاسترداد هذه نفسها كقوة قصورية تقاوم تسارع الجسيم.

عندما يكون الجسيم في حالة سكون في مجال ثقالي، فإن أنبوبه الكونى يكون مشوّها أيضا، حيث يكون الجسيم ممنوعا من السقوط ويكون أنبوبه الكونى لاجيوديسيًا. يؤدى تشوه الأنبوب الكونى أيضا إلى قوة استرداد ساكنة تظهر على هيئة ما يسمى تقليديا بالقوة الجاذبية (الثقالية) المؤثرة على جسيم معلق في مجال جاذبية ثقالية. لكن قوة الاسترداد في هذه الحالة تكون لها نفس طبيعة القوة في حالة جسيم متسارع، حيث إنها أيضا تحاول استعادة الشكل الجيوديسى للأنبوب الكونى للجسيم الساكن في مجال الجاذبية. بكلمات أخرى، يمكن النظر إلى القوة القصورية والجاذبية الثقالية على أنها نشأت أصلا من إجهاد(*) رباعي الأبعاد في أنبوب كونى مشوّه لجسيم غير قصورى (متسارع أو ساكن في مجال جاذبية ثقالى). ينشأ الإجهاد رباعي الأبعاد عندما يشوّه الأنبوب الكونى للجسيم، وهذا بدوره ينشأ بسبب حيود الأنبوب الكونى عن حالته الجيوديسية.

(*) هذا الافتراض مبنى بوضوح على القياس مع قضيب ثلاثي الأبعاد – تنشأ قوة الاسترداد في قضيب مشوه ثلاثي الأبعاد من إجهاد ثلاثي الأبعاد ناشئ في قضيب مشوه.

في الفصل التاسع سوف ندرس العلاقة التى تربط بين القضية المتعلقة بطبيعة الزمكان والسؤال المفتوح عن القصور الذاتى، وسوف نوضح أن القصور الذاتى دليل آخر على الكون رباعي الأبعاد. ولتحديد ما إذا كانت قوة الاسترداد الناشئة في أنبوب كونى مشوه لجسيم لاقصورى يمكن اعتبارها القوة القصورية المؤثرة على الجسيم، فإننا سندرس أولا أصل القوة القصورية المؤثرة على شحنة كهربية. سنحتاج لحساب هذه القوة أن نركز على قضية لم تحظ حتى الآن إلا باهتمام قليل – وهى أن انتشار الضوء (وأى اضطرابات كهرمغناطيسية[*] في أُطر إسناد لاقصورية يكون متباين الخواص في جميع الاتجاهات. ويمكن حساب قوة الاسترداد المؤثرة على شحنة غير قصورية في إطار إسناد غير قصورى، حيث تكون الشحنة ساكنة، وذلك بأن تؤخذ سرعة الضوء غير المتماثلة اتجاهيا هناك في الاعتبار. ولهذا الغرض خصصنا الفصل السابع لدراسة الانتشار غير المتماثل اتجاهيا للضوء في أُطر إسناد لاقصورية. وبما أن الجهود القياسية والمتجهة لشحنة قيد الوصف في إطار إسناد لاقصورى تكون متأثرة بسرعة الضوء غير المتماثلة اتجاهيا هناك، فإن إجراء حسابها قد تم في الفصل الثامن.

القضايا المطروحة في الفصلين السابع والثامن هى نتائج تحليل طبيعة الزمكان، بصرف النظر عن أنهما ضروريان لمعالجة السؤال المتعلق بالقصور الذاتى. وعلى نحو أخص، فإن الانتشار غير المتماثل اتجاهيا للضوء في أُطر إسناد لاقصورية، وتأثيره على جهد الشحنة ومجالها هناك يُعزيان إلى إطلاق التسارع بغير قيد ولا شرط، وهذا بدوره ينتج من التمييز المطلق بين خط الكون الجيوديسى والمشوّه.

(*) للاختصار سوف نستخدم مصطلح "ضوء" بدلا من "اضطرابات كهرمغناطيسية". كما سوف نرى لاحقا، يكون انتشار جميع التأثرات غير متماثل اتجاهيًا في أُطر الإسناد اللاقصورية.

فضلا عن ذلك، لا يكون من الممكن الوصول إلى فهم حقيقى لأسباب الانتشار غير المتماثل اتجاهيا للضوء في أُطر إسناد لاقصورية، ولما يكمن وراء تكافؤ الظواهر الفيزيائية في أُطر إسناد لاقصورية (مبدأ التكافؤ)، إلا إذا أخذت واقعية الأنابيب الكونية للأجسام الفيزيائية بجّدية. إن انحراف الأنابيب الكونية للأجسام غير القصورية عن أشكالها الجيوديسية في كلا الزمكانين المسطح والمنحنى هو ما يسبّب اللاتماثل (التباين في الخواص) اتجاهيا في انتشار الضوء في مثل هذه الأُطر ويؤدى إلى مبدأ التكافؤ. وبالإضافة إلى اعتبار القصور الذاتى بمثابة إثبات آخر لبُعْدِيّة الكون الرباعية، أمكن التوصل إلى نتيجتين رئيسيتين جديدتين باعتبار الأنابيب الكونية للأجسام الفيزيائية كأنها أجسام رباعية الأبعاد:

تعريف سرعتين متوسطتين للضوء، أُهملتا حتى الآن – السرعة الإحداثية والسرعة الحقيقية – في أُطر الإسناد اللاقصورية والتعرف على سبب اللاتماثل اتجاهيا في انتشار الضوء هناك – انحناء الأنابيب الكونية للأجسام التى ينتشر الضوء بينها. ومما يعين على فهم أعمق لتأخر زمن شابيرو، والانزياح الأحمر بفعل الجاذبية الثقالية، وتأثير ساجناك، أن يؤخذ في الاعتبار انتشار الضوء اللامتماثل اتجاهيا في الأُطر اللاقصورية.

يؤدى الوصف الحقيقى التام للظواهر الكهرمغناطيسية في أُطر الإسناد اللاقصورية بدلالة سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيا إلى تعريف كمية أخرى لم يُلتفت إليها – عنصر حجم لامتماثل اتجاهيا – تحلّ مسألتين آنيا – وتفسر المعامل ½ في جهد فيرمى لشحنة في مجال جاذبية ثقالية والمعامل 4/3 في قوة ذاتية مؤثرة على شحنة لا قصورية.

فى الفصل الأخير من هذا الجزء سوف نستكشف التضمينات الخاصة بواقعية الزمكان لعالم الكوانتم (الكم). ونظرا لأن الزمكان يعتبر بلا شك ميدانا للتنافس على المستوى الكوانتى (الكمومي) أيضا، فإن السؤال الطبيعى يكون: ما هو الجسم الكوانتى في الزمكان، الذى يختص بالدليل القاطع على أنه ليس خطا كونيا؟ الإجابة على هذا السؤال يمكن أن توضح أن السلوك الاحتمالى للأجسام الكوانتية وصورة الكون الزمكانية إلى الأبد لا يناقض كل منهما الآخر على وجه الإطلاق.

الفصل السابع

انتشار الضوء في أطر إسناد لا قصورية

٧,١ التسارع مطلق في النسبية الخاصة والعامة

رأينا في الفصل الرابع أن النسبية الخاصة، التى تصف فيزياء الزمكان المسطح، توفر معيارا واضحا لمطلقية التسارع في الزمكان المسطح – الخط الكوني لجسم متحرك بسرعة ثابتة يكون خطا مستقيما، أما الخط الكوني لجسم يتعرض لتسارع (زمكان مسطح) عادى:

$$a^{\mu}_{\text{flat}} = \frac{\mathrm{d}^2 x^{\mu}}{\mathrm{d}\tau^2}$$

فيكون منحنيا، إلاّ أنه لا توجد أنابيب كونية مستقيمة في زمكان منحنٍ، وهو ما تصفه النسبية العامة. وبما أن الخط الكونى المستقيم في زمكان مسطح يمثل جسما متحركا بدون مقاومة (أى بالقصور الذاتى) – مثل هذه الخطوط الكونية تسمى جيوديسيات Geodesics. بعبارة أخرى، الخط الكونى لجسم تسارعه في زمكان منحن

$$a^{\mu}_{\text{curved}} = \frac{\mathrm{d}^2 x^{\mu}}{\mathrm{d}\tau^2} + \Gamma^{\mu}_{\alpha\beta} \frac{\mathrm{d}x^{\alpha}}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}x^{\beta}}{\mathrm{d}\tau}$$

يساوى صفرا، يكون جيوديسيا. عندئذ يظل معيار مطلقية التسارع نفسه قائمًا أيضا في زمكان منحنٍ: الجسم الذى يكون خطه الكونى جيوديسيا لا يتعرض لتسارع في زمكان منحن (أي أن $a^{\mu}_{curved}=0$ ويتحرك بدون مقاومة (بالقصور الذاتى)، أما الخط الكونى لجسم تسارعه في زمكان منحن a^{μ}_{curved} يختلف عن الصفر فلا يكون جيوديسيا(*).

لهذا فإن الفرق المطلق بين خط كونى جيوديسي (يمثل في حالة زمكان مسطح جسما لا يمكن اكتشاف حركته المنتظمة المطلقة) وخط كونى لاجيوديسي يجعل الحركة المتسارعة مطلقة. مثل هذه النتيجة ربما تدل ضمنا على أن هناك فضاءً أو مكانًا واحدًا. لماذا لم يُناقش ذلك هكذا في الفصل الرابع. طالما أن جميع المراقبين الموجودين في حالة حركة لديهم أماكن مختلفة، فإن الجسم المتسارع يتحرك بالنسبة لتلك الأماكن، وليس بالنسبة لمكان معين وحيد. يكون التسارع مطلقا بمعنى أن يكون الخط الكونى المنحنى منحنيًا بالنسبة لكل المراقبين، وهو ما يفسر السبب في أن الحركة المتسارعة لجسم ما يمكن اكتشافها من خلال إطار الإسناد اللاقصورى الذى يكون الجسم فيه ساكنا.

ينتج من تحليل طبيعة الزمكان على النحو الموضح في الفصل الخامس أن هذا الفرق ليس مجرد سمة للصيغة الرياضية المعبرة عن النسبية الخاصة والعامة، التى لا علاقة لها بطريقة فهم التسارع. وتكون الخطوط الكونية للأجسام الفيزيائية أجساما واقعية رباعية الأبعاد، وذلك طبقا للنسبية الخاصة،

(*) فى مقابل الحال في النسبية الخاصة، حيث يكون التسارع مطلقا، يوجد في النسبية العامة تسارع نسبى بالإضافة إلى التسارع المطلق المعرّف هنا. ونظرا لعدم وجود خطوط كونية مستقيمة في زمكان منحن، فإن الجسمين الذين لهما خطان كونيان جيوديسيان يظهران متسارعين بالنسبة لبعضهما؛ يعطى معدل تغير المسافة بينهما بمعادلة الانحراف الجيوديسي [٩٧، ص ٣٤٣].

وطبقا، وهو الأهم، للإثبات التجريبى الذى يؤكد توقعاتها. هذا يعنى أن الفرق بين خط كونى جيوديسي وآخر غير جيوديسي يعكس حقيقة موضوعية في الكون الخارجى يمكن اكتشافها تجريبيا. بكلمات أخرى، سوف نستطيع اكتشاف حركة إطار إسناد لاقصورى يكون فيه الجسم المتسارع ساكنا، وذلك بإجراء تجارب داخل ذلك الإطار(*). ذلك يعنى ضمنا أن أشكال قوانين الطبيعة في أُطر الإسناد القصورية ليست واحدة. وينتج من هذا على الفور أن سرعة الضوء ليست ثابتة في الأُطر غير القصورية – فهى تعتمد على التسارع الحقيقى للإطار(**). يسمح هذا الاعتماد لمراقب غير قصورى أن يكتشف حركته المتسارعة باستخدام إشارات ضوئية.

(*) فى زمكان مسطح، يكون إطار الإسناد اللاقصورى مصحوبا بجسم متسارع، وليكن سفينة فضاء محركاتها في حالة تشغيل. أما في زمكان منحن، فيكون إطار الإسناد اللاقصورى مصحوبا إما بجسم متسارع (مثل تلك السفينة الفضائية) التى يكون خطها الكونى غير جيوديسي، وإما بجسم ساكن في مجال جاذبية لا يكون خطه الكونى جيوديسيا أيضا. وفى كلتا الحالتين يكون التسارع في الزمكان المنحنى $a^{\mu}_{curved} \neq 0$. أما في زمكان مسطح فيكون إطار الإسناد القصورى مصحوبا بجسم متحرك بالقصور الذاتى. لكن الحال في زمكان منحن أكثر تعقيدا. ربما يكون السؤال عما إذا كان يمكن استخدام الإحداثيات الكارتيزية أم لا هو أفضل طريقة للتفكير فيما إذا كان من الممكن إدخال إطار إسناد قصورى. يمكن إدخال نظام الإحداثيات الكارتيزية (محاوره خطوط مستقيمة) عالميا Globally فى زمكان مسطح ويمثل إطار إسناد عالميًا. يمكن عمل هذا لأن هناك خطوطا مستقيمة في زمكان مسطح. وبسبب غياب خطوط مستقيمة في زمكان منحن، فإن الإحداثيات الكارتيزية لا يمكن إدخالها هناك، مما يعنى أن المرء لا يستطيع التحدث عن أُطر قصورية عالمية في زمكان منحن. لكن الإحداثيات الكارتيزية يمكن استخدامها في الجوار متناهى القرب من أى نقطة معطاة في زمكان منحن، لأن الجوار متناهى القرب من أى نقطة معطاة يمكن اعتباره نطاقا زمكانيًا مسطحًا صغيرًا يلامس الزمكان المنحنى عند تلك النقطة، وفى ذلك النطاق يكون الخط الكونى الجيوديسي خطا مستقيما. لهذا يستطع المرء إدخال أُطر قصورية موضوعية فقط في زمكان منحن.

(**) التسارع الحقيقى يطلق على تسارع إطار إسناد لا قصورى محدد في الإطار القصورى اللحظى (المتحرك بالتلازم).

٧,٢ الحاجة لسرعتين متوسطتين للضوء في أُطر إسناد لا قصورية

النتيجة الطبيعية للنسبية، والتى تقضى بأن السرعة المحددة للضوء في إطار إسناد لا قصورى تعتمد على تسارع الإطار، لم تحظ حتى الآن إلا باهتمام قليل. ونتيجة لذلك لم يتم التحقق من أن الوصف التام لانتشار الضوء في أُطر إسناد لا قصورية يحتاج إلى سرعتين متوسطتين للضوء – سرعة إحداثية متوسطة وسرعة حقيقية متوسطة. وكلتا السرعتين المتوسطتين تعتمدان على التسارع الحقيقى لإطار الإسناد اللاقصورى. لكن ينبغى التأكيد على أن السرعة الإحداثية المتوسطة للضوء بين نقطتين هى التى تختلف عن c. دعنا نعتبر عدة أمثلة لتوضيح سبب الحاجة لسرعتىْ ضوء متوسطين:

• تجربة آينشتين الفكرية [٩٨] التى صممت لإثبات التكافؤ بين أُطر إسناد لاقصورية N^g (مصحوبة بمصعد ساكن في مجال جاذبية) وN^a (مصحوبة بمصعد متسارع في فضاء خال من الجاذبية)، وذلك باستخدام مصعد ساكن في مجال جاذبية موازٍ(*) شدته g ومصعد يتسارع بتسارع **a=-g**. أطلق آينشتين علىٰ هذا التكافؤ اسمِ مبدأ التكافؤ الذى يقضى بأنه: يستحيل التمييز بواسطة التجربة بين أُطر الإسناد غير القصورية N^a وN^g، مما يعنى أن جميع الظواهر الفيزيائية تبدو واحدة في N^a وN^g. ولهذا فإنه إذا انحنى شعاع ضوئى أفقى منتشر فى N^a فإن شعاعا ضوئيا أفقيا منتشرا في N^g لابد أن ينحنى أيضا. والأكثر أهمية فيما يتعلق بالسؤال عن مطلقية التسارع في تجربة آينشتين الفكرية هو أن انحناء الضوء في إطار إسناد متسارع N^a هو بالضبط تأثير يسمح لمراقب في N^a أن يستنتج أنه متسارع. لكن انحناء الضوء لا يوضح على الفور أن السرعة المتوسطة للضوء يجب استخدامها

(*) بالنسبة للقضايا المطروحة هنا يكفى افتراض أن مجال الجاذبية في مصعد ساكن على سطح الأرض يُعدّ تقريبا جيدا لمجال الجاذبية الموازى.

لوصف انتشار الضوء في N^a. ولكي ترى أن مثل هذه السرعة مطلوبة حقيقة افترض بدلا من الشعاع الأفقي، أن المراقب في N^a قرر أن يستخدم شعاعين رأسيين(*) – أحدهما منبعث من سقف المصعد إلى أسفل والآخر من أرضية المصعد إلى أعلى (كما هو مبين في شكل ٧,١). عندما يتحرك المعجّل بسرعة ثابتة، سوف يلتقي الشعاعان الضوئيان عند نقطة المنتصف B (بين الأرضية والسقف). لكن عندما يتسارع المصعد سيتقابل الشعاعان عند نقطة B' واقعة أسفل B في اتجاه أرضية المصعد. كما سنرى في القسم التالي، هذه الحقيقة لا يمكن تفسيرها بدون إدخال سرعة إحداثية متوسطة للضوء تعتمد على التسارع الحقيقي للمصعد.

• يستطيع مراقب في إطار إسناد دوّار، قرص دوّار مثلا، أن يكتشف أيضا الحركة المتسارعة للقرص باستخدام ضوء (ما يسمى تأثير ساجناك): إشارات ضوئية منبعثة من نقطة P في اتجاهات متعاكسة على طول حافة القرص لن تصل في نفس الوقت عند P [١٠٣]. وبدون اعتبار حقيقة أن سرعة الضوء المحددة في إطار الإسناد الدوار تعتمد على تسارع الإطار، فإن هذا التأثير لا يمكن تفسيره على نحو مرضٍ أيضا.

• مطلوب سرعة متوسطة ثانية للضوء – سرعة ضوء حقيقية متوسطة – لتفسير عدد من الظواهر تحدد فيها سرعة الضوء بالنسبة لنقطة معينة معطاة. على سبيل المثال، سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة تستخدم ضمنيا في التأخر الزمني لشابيرو [١٠٤ ، ١٠٥]. كذلك يثبت في النهاية أن

(*) حتى كتب الفيزياء التمهيدية [٩٩، ١٠٠، ١٠١، ١٠٢] تبدأ بمناقشة تجربة المصعد لآينشتين، وعلى الرغم من ذلك أُهمل السؤال الواضح التالي: هل أشعة الضوء المنتشرة في مصعد في اتجاه رأسي (متوازٍ وغير متوازٍ مع **a** أو **g**) تتأثر أيضا بالحركة المتسارعة للمصعد أو بكونها في مجال جاذبي (ثقالي)؟

هذه السرعة ليست دائما c. والقول بأن سرعة الضوء المتوسطة بين النقطتين تكون أصغر من c يتضح من الحقيقة التى تقضى بأن الإشارة الضوئية تستغرق لتنتقل بين نقطتين P و Q في مجال جاذبية زمنا أكبر مما تستغرقه بين النقطتين أنفسها في زمكان مسطح عند مراقبتها من إحدى النقطتين. وبخلاف السرعة الإحداثية، تعتمد سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة بين نقطتين على أيٍّ من النقطتين تقاس عندها. تؤكد هذه الحقيقة اعتماد التأخر الزمنى لشابيرو على النقطة التى يقاس عندها، وتبين، كما سوف نرى في القسم ٧,٥، أنه في حالة مجال جاذبية موازٍ لا يكون التأثير دائما تأخرًا زمنيا (فى مثل هذا المجال تعرف سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة بدلالة كل من البعد الحقيقى والزمن الحقيقي للمراقب، وهو ما يبرر استخدام مصطلح "حقيقى"). سوف تتأخر الإشارة الضوئية فقط إذا قيست عند نقطة P أبعد من الكتلة الجاذبة المحدثة للمجال الموازي؛ وإذا قيست عند النقطة الأخرى Q الأقرب من الكتلة فإن الإشارة سوف تستغرق زمنًا أقل لتنتقل المسافة نفسها. يوضح هذا أن السرعة الحقيقية المتوسطة للإشارة المحددة عند Q تكون أكبر من تلك المقاسة عند P وأكبر قليلا من c. والسرعة الحقيقية المتوسطة للضوء، كما سنرى في الفصل الثامن، تكون أيضا مطلوبة لحساب الجهد والمجال الكهربى لشحنة في إطار إسناد لاقصورى مباشرة في ذلك الإطار، بدون الحاجة إلى تحويل المجال من إطار الإسناد القصورى الموضعى.

• إدخال سرعات الضوء المتوسطة يلقى أيضا بعض الضوء على سمة دقيقة لانتشار الضوء بالقرب من جسم ثقيل ضخم – سواء سقط الضوء أو لم يسقط في مجال جاذبيته. المفهوم الجسيمى للضوء، فيما يبدو، يؤدى إلى أن الفوتون، مثل أى جسيم آخر، سوف يسقط في مجال جاذبية ما (بسبب الكتلة المناظرة لطاقته)، ويدعم مثل هذا المنظر انحراف الضوء بواسطة

الجسم الضخم. وقد تم التعبير عن هذا المنظر أحيانا، صراحة أو ضمنا في كتب وأوراق بحثية، مع أن الشرح الصحيح موجود في كتب مختصة بالنسبية العامة (انظر على سبيل المثال [٢٦، ١٠٦]). هناك من زعم حديثا أن قضية تشعيب سقوط أو عدم سقوط شحنة في مجال جاذبية يمكن حلّها بافتراض أن المجال الكهرمغناطيسي للشحنة ساقط أيضا [١٠٧]. مثل هذا الزعم يحتاج إلى تبرير كافٍ لأن المجال الكهرمغناطيسي الساقط في مجال جاذبية يعنى أن الضوء يسقط في مجال الجاذبية أيضا، وليس الحال كذلك كما سنرى بإيجاز. حتى آينشتين وإنفيلد يبدو أنهما اقترحا أنه كلما كانت حزمة الضوء ذات كتلة على حساب طاقتها فإنها سوف تسقط في مجال جاذبية [٩٨]: "سوف تنحنى حزمة الضوء في مجال جاذبية مثلما يحدث تماما لجسم يقذف به أفقيًا بسرعة تساوي سرعة الضوء". هذه المقارنة ليست دقيقة تمامًا لأن المركبة الرأسية لسرعة الجسم سوف تزداد كلما سقط، بينما تتناقص سرعة حزمة الضوء "الساقطة" بالنسبة لمراقب لاقصوري (معلق في مجال جاذبية)، على نحو ما سنرى أدناه. توجد أحيانًا عبارات مثل "حزمة ضوء سوف تتسارع في مجال جاذبية، تماما مثل الأجسام التى لها كتلة"، ولهذا فإن "ما يحدث بالقرب من سطح الارض من أن الضوء يسقط بتسارع مقداره $9.81 m/s^2$". يمكن أن نجده في كتب الفيزياء التمهيدية [٩٩]. سوف نرى لاحقا أن الضوء أثناء "سقوطه" في مجال جاذبية يتباطأ – تسارع سالب مقداره $9.81 m/s^2$ يعمل على تناقص سرعته.

أود، قبل استنتاج السرعات المتوسطة للضوء في أُطر إسناد لاقصورية، أن أعلق على تفسير محتمل لتعليل إهمال الحاجة إلى إدخال هذه السرعات. لقد استخدمت السرعة الإحداثية للضوء أولا في النسبية العامة،

لأن المغزى الفيزيائى لكميات تعتمد على الإحداثيات غالبا ما كان محل شك. وربما كانت الحقيقة التى تقضى بأن السرعة الإحداثية للضوء عبارة عن دالة جهد الجاذبية هى ما يعزز معارضة أخذها بجدية أكثر. ولأن تعيين جهد الجاذبية في حدود الثابت، فإنه يبدو أن السرعة الإحداثية للضوء لا تعكس كمية فيزيائية.

لنترك جانبا تلك الحقيقة التى تقضى بأن التبرير نفسه ينطبق على جهد الجاذبية ذاته (وأنا أشك في أن فيزيائيين عديدين سيوقعون بأسمائهم تحت عبارة أن الجهد الجاذبي لا يعكس أى شيئ موضوعى) سوف أوجز عدة توضيحات تبين، فيما أرى، أن السرعة الإحداثية للضوء تستحق اهتماما أكثر دقة في النسبية العامة وفى أُطر الإسناد اللاقصورية عموما:

• استخدم آينشتين سرعة الضوء الإحداثية في بحثه المنشور عام ١٩١٦م لحساب زاوية انحراف الضوء المنحنى قريبا من الشمس [١٥٩] (انظر أيضا [١١٥]).

• كذلك استخدمت سرعة الضوء الإحداثية لحساب تأخر الضوء في مجال جاذبية (التأخر الزمنى لشابيرو) [٩٧، ص ١٩٧] ، [١٠٦، ص E-1].

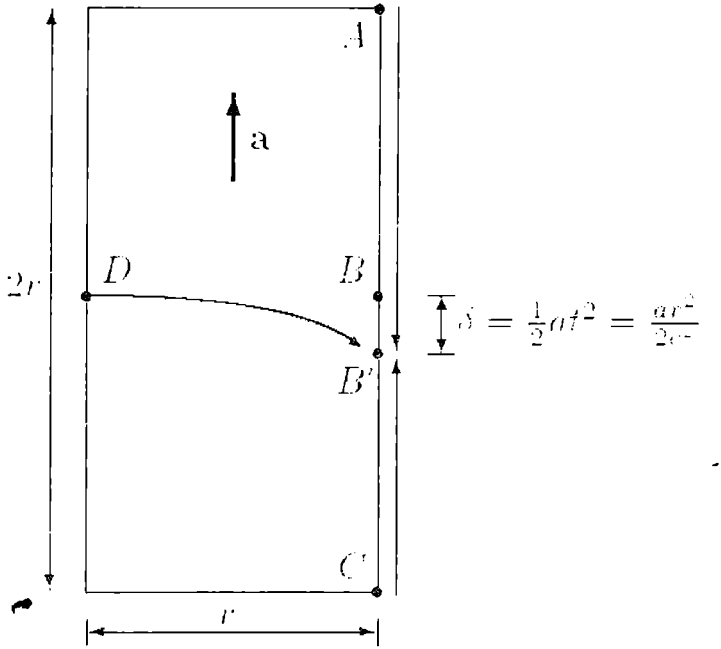
• لب المفهوم الخاص بالثقوب السوداء يعنى ضمنا أن سرعة الضوء الإحداثية تعكس حقيقة مهمة عن هذه الأشياء – سرعة الضوء الإحداثية عند أفق الحدث تساوي صفرًا، مما يفسر السبب في أن الضوء لا يستطيع الهروب من منطقة أقصى انحناء زمكانى محيط بثقب أسود.

• الحقيقة التى تقضى بأن الإشارات الضوئية المنتشرة على طول وعكس تسارع إطار الإسناد اللاقصورى (ستناقش في القسمين التاليين) تلتقى عند B` (وليس B)، لا يمكن تفسيرها بدون إدخال سرعة الضوء الإحداثية المتوسطة التى تختلف عن c.

• فى إطار إسناد متسارع، تعتمد السرعة الإحداثية للضوء على التسارع الحقيقى للإطار ولم تحدد في حدود المقدار الثابت. وفى مجال جاذبية موازٍ، تعتمد السرعة الإحداثية للضوء أيضا على التسارع الحقيقى للإطار.

• تستخدم السرعة الإحداثية للضوء في استنتاج سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة، وهذا بدوره مطلوب لحساب (i) التأخر الزمنى لشابيرو و(ii) الجهد، والمجال الكهربى، والقوة الذاتية للشحنة مباشرة في إطار إسناد لاقصورى (كما سنرى في الفصلين الثامن والتاسع).

• البرهان الأساسي الأكثر إقناعًا لاستخدام سرعة الضوء الإحداثية يأتى، فيما أرى، من القضية المتعلقة بطبيعة الزمكان. صحيح أن تعريف جهد الجاذبية يحتوى على عنصر التقليد المألوف عادة، ولهذا فإنه يجعل تعريف السرعة الإحداثية للضوء اصطلاحيا أيضا إلى حد ما. من الواضح أن المهم هنا هو الاستخدام المنسق للاصطلاح مادام قد حظى بالقبول؛ وهذا هو سبب إعمال مفهوم جهد الجاذبية في الفيزياء. رأينا في الفصل الخامس أن الواقع الحقيقي هو كون رباعي الأبعاد لا يوجد فيه شيء كالسرعة – يوجد فقط خطوط كونية. ولا يمكننا إدخال مفهوم السرعة إلا عندما نريد وصف هذا الكون الموجود سرمديا بدلالة لغتنا اليومية المستخدمة لعالم ثلاثي الأبعاد. لكن، نظرا لأن هذا المفهوم ليس له نظير أنطولوجى ولا يفيد إلا في أغراض *الوصف*، فإننا نكون بالتالى أحرارًا في اختيار اللغة التى نصف بها العالم الخارجى (الخالى من السرعة).



شكل ٧,١ ثلاثة أشعة ضوئية تنتشر في مصعد متسارع، انبعثت معا آنيا من النقاط A وC وD والتقت عند B'. الشعاع المنتشر من D نحو B، لكنه يصل عند B'، يمثل التجربة الفكرية الأصلية التى اعتبرها آينشتين. تم إدخال الشعاعين الضوئيين A و C لتحديد الصيغ اللازمة لسرعة الضوء المتوسطة في إطار إسناد متسارع.

٧,٣ السرعة الإحداثية المتوسطة للضوء

يمكن إجراء حساب السرعة الإحداثية المتوسطة للضوء بين نقطتين في إطار إسناد متسارع N^a باعتبار شعاعين ضوئيين آخرين أحدهما موازٍ والآخر مضاد للتسارع a الذى يتحرك به مصعد آينشتين. بالإضافة إلى الشعاع الأفقي الذي اعتبره آينشتين في الأصل.

اعتبر إطارًا إسناديا لاقصوريا N^a ساكنا، يتسارع فيه مصعد بتسارع $a=|\mathbf{a}|$ (شكل ٧,١). انبعثت ثلاثة أشعة ضوئية آنيا في المصعد (فى N^a) من النقاط D و A و C نحو نقطة B. ليكن I إطارا إسناديا قصوريا في حالة سكون لحظيا بالنسبة للإطار N^a (أى لإطار المتحرك بالتلازم لحظيا) في لحظة انبعاث الأشعة الضوئية. بما أن I و N^a لهما حيز (مكان) لحظى مشترك ثلاثي الأبعاد؛ ومن ثم لهما آنية مشتركة عند لحظة انبعاث الإشارات الضوئية الثلاثة، فإن انبعاث الأشعة يكون آنيا في N^a أيضا كما في I. في اللحظه التالية يري مراقب في I أن الأشعة الضوئية الثلاثة لا تصل آنيا إلى النقطة B، بل تصل إلى B'، لأنه خلال الزمن $t=r/c$ تنتقل الأشعة الضوئية نحو B، ويتحرك المصعد مسافة $\delta=at^2/2=ar^2/2c^2$. وبما أن الوصول الآنى للأشعة الثلاثة عند النقطة B' كما ترى في I حقيقة مطلقة (لا تعتمد على مراقب) بسبب كونها حدثا نقطيا a point event فإنه ينتج أن تصل الأشعة آنيا إلى B' كما يرى من N^a أيضا. وبما أن الأشعة الضوئية الثلاثة، في نفس الزمن الإحداثى $t=r/c$ في N^a، تقطع مسافات مختلفة $DB'\approx r$، $AB'=r+\delta$، $CB'=r-\delta$، قبل الوصول آنيا إلى النقطة B'، فإن مراقبا في المصعد يستنتج أن انتشار الضوء قد تأثر بتسارع المصعد. السرعة المتوسطة للشعاع الضوئى المنتشر من A إلى B' تكون أكبر قليلا من C: $c^a_{AB'}$

$$c^a_{AB'}=\frac{r+\delta}{t}\approx c\left(1+\frac{ar}{2c^2}\right).$$

السرعة المتوسطة $c^a_{B'C}$ لشعاع الضوء المنتشر من C إلى B' تكون أقل قليلا من c:

$$c^a_{AB'}=\frac{r+\delta}{t}\approx c\left(1+\frac{ar}{2c^2}\right).$$

يتضح بسهولة أنه في نطاق حدود متناسبة مع c^{-2} تكون سرعة الضوء المتوسطة بين A و B مساوية لتلك التي بين A و B'، أى أن $C^a_{AB} = C^a_{AB'}$ وأيضا $C^a_{CB} = C^a_{CB'}$:

$$c^a_{AB} = \frac{r}{t - \delta/c} = \frac{r}{t - ar/2c} = \frac{c}{1 - ar/2c^2} \approx c\left(1 + \frac{ar}{2c^2}\right) \qquad (7.1)$$

و

$$c^a_{CB} = \frac{r}{t + \delta/c} \approx c\left(1 - \frac{ar}{2c^2}\right). \qquad (7.2)$$

وحيث إنه لم يتم تحديد السرعتين المتوسطتين (٧,١) و (٧,٢) بالنسبة لنقطة معينة، وبما أن الزمن الإحداثى t متضمن في حسابهما، فإنه يتضح أن التعبيرين (٧,١) و (٧,٢) يمثلان السرعتين الإحداثيتين المتوسطتين بين النقطتين A و B والنقطين C و B على التوالى.

يمكن أيضا الحصول على العلاقات نفسها للسرعتين الإحداثيتين المتوسطتين ومن معادلة السرعة الإحداثية للضوء في N^a. إذا كان المحور z موازيا لتسارع المصعد a، فإن القياس الزمكانى في N^a يكون على الصورة [٥٦، ص ٧٣]:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{az}{c^2}\right)^2 c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2. \qquad (7.3)$$

لاحظ أن هناك قيودا على حجم أُطر الإسناد غير القصورية المتسارعة أو الساكنة في مجال جاذبية مواز، كما يمثله القياس (٧,٣)، وذلك بسبب وجود أفق عند $z = -c^2/a$ [٥٦، صفحات ١٦٩، ١٧٢ – ١٧٣]. إذا تغير أصل N^a، وليكن إلى $z_B = 0$ (انظر شكل ٧,١)، فإن الأفق يتحرك إلى $z = -c^2/a - |z_B|$.

بما أن الضوء ينتشر على طول جيوديسيات صفرية، ذات $ds^2 = 0$، فإن السرعة الإحداثية للضوء على طول المحور z عند نقطة ما z في N^a تكون

$$c^a(z) = \pm c\left(1 - \frac{az}{c^2}\right) . \qquad (7.4)$$

العلامتان + و − هما بالنسبة للضوء المنتشر على طول أو ضد z على التوالي. لهذا فإن السرعة الإحداثية للضوء عند نقطة z تكون متماثلة موضعيا في الاتجاه z. من الواضح أن $c^a(z)$ لا يمكن أن تصبح سالبة بسبب القيود على حجم أُطر غير قصورية، مما يؤكد أن $z < c^2/a$ [56، الصفحات من ١٦٩ إلى ١٧٢].

حيث إن السرعة الإحداثية $c^a(z)$ متصلة على الفترة [z_A، z_B]، فإنه يمكن حساب السرعة الإحداثية المتوسطة بين A، B في شكل (٧,١)

$$c^a_{AB} = \frac{1}{z_B - z_A}\int_{z_A}^{z_B} c^a(z)\,dz = c\left(1 + \frac{az_B}{c^2} - \frac{ar}{2c^2}\right) . \qquad (7.5)$$

حيث أخذنا في الاعتبار حقيقة أن $z_A = z_B + r$. عندما يكون الأصل الإحداثي عند نقطة $B(z_B = 0)$، تتطابق المعادلة (٧,٥) مع المعادلة (٧,١). وبنفس الطريقة

$$c^a_{BC} = c\left(1 + \frac{az_B}{c^2} - \frac{ar}{2c^2}\right) . \qquad (7.6)$$

حيث $z_C = z_B - r$. وعند $z_B = 0$ تتطابق (٧,٦) مع (٧,٢).

سرعة الضوء الإحداثية $c^a(z)$ تكون أيضا متصلة على الفترة [t_A ، t_B]، لكن لحساب c^a_{AB} بأخذ متوسط سرعة الضوء على زمن انتشاره من A إلى B يلزم إيجاد اعتماد z على t . من المعادلة (٧,٣) يمكننا كتابة (عند $ds^2 = 0$):

$$dz = c\left(1 + \frac{dz}{c^2}\right) dt .$$

بالتكامل والإبقاء فقط على الحدود المتناسبة مع c^{-2} نجد أن z=ct، وهذا يبين أن $c^a(z)$ أيضا خطية في t (فى نطاق الحدود المتناسبة مع c^{-2}):

$$c^a(t) = \pm c\left(1 + \frac{dt}{c}\right) .$$

إذن، بالنسبة لسرعة الضوء الإحداثية المتوسطة بين النقطتين A و B يكون لدينا

$$c^a_{AB} = \frac{1}{t_B - t_A}\int_{t_A}^{t_B} c^a(z)\,dt = \frac{1}{t_B - t_A}\int_{t_A}^{t_B} c\left(1 + \frac{dz}{c^2}\right) dt$$
$$= \frac{1}{t_B - t_A}\int_{t_A}^{t_B} c\left(1 + \frac{dt}{c}\right) dt = c\left(1 + \frac{dz_B}{c^2} + \frac{dr}{2c^2}\right) . \qquad (7.7)$$

حيث تم استخدام مقدار $c^a(z)$، إلى جانب $z_A = z_B + r$, $z_A = ct_A$ و $z_B = ct_B$. هذه المعادلة، كما هو متوقع، تتطابق مع المعادلة (٧,٥)، وفى حالة z_B=0 تكون مساوية للمعادلة (٧,١).

الحقيقة التى تقضى بأن $c^a(z)$ خطية في كل من z و t (فى نطاق الحدود المتناسبة مع c^{-2}) تجعل من الممكن حساب السرعة الإحداثية المتوسطة للضوء المنتشر بين A و B (انظر الشكل ٧,١) باستخدام قيمتى $c^a(z)$ فقط عند النقطتين النهائيتين A و B:

$$c^a_{AB} = \frac{1}{2}(c^a_A + c^a_B) = \frac{1}{2}\left[c\left(1 + \frac{dz_A}{c^2}\right) + c\left(1 + \frac{dz_B}{c^2}\right)\right] .$$

وبما أن $z_A = z_B + r$ ، فإن

$$c''_{AB} = c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2} + \frac{gr}{2c^2}\right).$$

هذه المعادلة تتطابق مع المعادلتين الخاصتين بـ $c''(z)$ في (٧,٥) و (٧,٧).

السرعتان الإحداثيتان المتوسطتان (٧,٥) و (٧,٦) تصفان بدقة انتشار الضوء في N^a وتعطيان التعبير الصحيح $\delta = ar^2/2c^2$ (انظر الشكل ٧,١). ويجب التأكيد على أن القول بأن الشعاعين الضوئيين المنبعثين من A و C يصلان عند `B وليس B لا يمكن تفسيره بدون هاتين السرعتين الإحداثيتين المتوسطتين.

السرعة الإحداثية المتوسطة، مثل السرعة الإحداثية، للضوء لا تحدد بالنسبة لنقطة معينة وتعتمد على اختيار الأصل الإحداثي فضلا عن ذلك، ويحدث الشئ نفسه بالنسبة لضوء منتشر من A إلى B ولضوء ينتقل في الاتجاه المعاكس، أي أن $c''_{AB} = c''_{BA}$. وبذلك، مثل السرعة الإحداثية (٧,٤)، تكون السرعة الإحداثية المتوسطة متماثلة أيضا، ولكن فقط بمعنى أن سرعة الضوء المتوسطة بين نقطتين تكون واحدة في كلا الاتجاهين. وكما يتضح من المعادلتين (٧,٥) و (٧,٦) فإن السرعة الإحداثية المتوسطة لضوء بين أزواج مختلفة من النقاط التي تفصلها مسافات متساوية تكون مختلفة، وتكون بهذا المعنى غير متماثلة اتجاهيا. ونتيجة لذلك، كما هو مبين في شكل ٧,١، يصل شعاع الضوء المنبعث عند A قبل شعاع الضوء المنبعث عند C.

وفي حالة إطار إسناد لا قصوري N^g مصحوب بمصعد معلق في مجال جاذبية موازٍ، حيث يكون المقياس [٥٦، ص ١٠٥٦]:

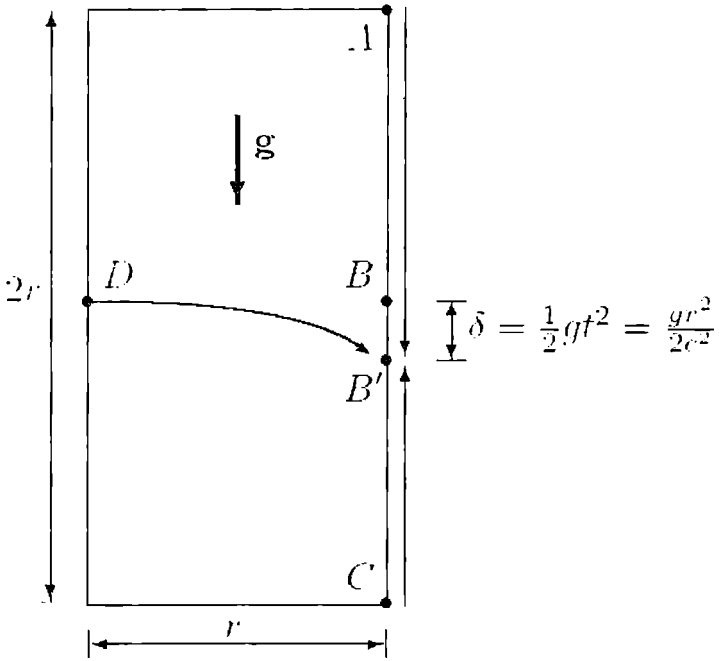
$$ds^2 = \left(1 - \frac{2gz}{c^2}\right) c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 . \qquad (7.8)$$

ويكون التعبيران الخاصان بسرعة الضوء الإحداثية المتوسطة بين A و B وبين B و C، على التوالى، هما:

$$c^g_{AB} = c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2} - \frac{gr}{2c^2}\right) \qquad (7.9)$$

و

$$c^g_{BC} = c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2} - \frac{gr}{2c^2}\right) .$$



شكل ٧,٢ انتشار ضوء في مصعد آينشتين الساكن بموازاة مجال جاذبية ثقالي

٧,٤ السرعة الحقيقية المتوسطة للضوء

السرعة الإحداثية المتوسطة للضوء تفسر انتشاره في مصعد آينشتين وفى أُطر إسناد لا قصورية بصورة عامة، ولكن لا يمكن استخدامها عندما تكون سرعة الضوء المتوسطة بين نقطتين (مثلا، مصدر ونقطة مراقبة) محددة بالنسبة لإحدى النقطتين. على سبيل المثال، مثل هذه الحالات تحدث في التأخر الزمنى لشابيرو والحالات التى نوقشت في الفصل الثامن. وبما أن سرعة الضوء الموضعية هى c، فإن السرعة المتوسطة للضوء بين مصدر ونقطة مراقبة تعتمد على اختيار أى من النقطتين لتكون نقطة إسناد يُنسب إليها تحديد السرعة المتوسطة. (عند نقطة الإسناد تكون السرعة الموضعية للضوء دائما هى c). ويوضح اعتماد السرعة على اختيار نقطة الإسناد أن تلك السرعة غير متماثلة اتجاهيا. هذه السرعة غير المتماثلة اتجاهيا يمكن اعتبارها كسرعة حقيقية متوسطة للضوء، لأنها محددة بالنسبة لنقطة معينة معطاة، ومن ثم فإنها تشمل الزمن الحقيقى عند تلك النقطة. وهى أيضا معرفة بدلالة المسافة الحقيقية كما حددها المراقب عند النقطة نفسها في حالة مجال جاذبية موازٍ.

دعنا نحدد سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة في إطار إسناد لاقصورى N^g مصحوب بمصعد ساكن في مجال جاذبية موازٍ شدته g. اعتبر مصدرًا ما للضوء عند نقطة B (شكل ٧,٢).

لحساب سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة عندما يبدأ من B ويُلاحَظ عند A (أى كما يُرى من A)، يجب أن نعين السرعة الابتدائية للإشارة الضوئية عند B وسرعتها النهائية عند A، كَنتاهما بالنسبة إلى A. بما أن سرعة الضوء الموضعية هى c، فإن السرعة النهائية للإشارة الضوئية المحددة عند A تكون هى c بوضوح. وبملاحظة أن المسافتين الحقيقية

والإحداثية متساويتان [١٠٨] في مجال جاذبية موازٍ، يمكننا تعيين السرعة الابتدائية للإشارة الضوئية عند B كما تُرى من A:

$$c_B^g = \frac{dz_B}{d\tau_A} = \frac{dz_B}{dt}\frac{dt}{d\tau_1} .$$

حيث $dz_B / dt = c^g(z_B)$ هى سرعة الضوء الإحداثية عند B،

$$c^g(z_B) = c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2}\right) .$$

و $d\tau_A = ds_A / c$ هو الزمن الحقيقى بالنسبة لمراقب ذى إحداثيات مكانية ثابتة عند A.

$$d\tau_A = \left(1 + \frac{gz_A}{c^2}\right) dt .$$

وبما أن $z_A = z_B + r$ و $gz_A / c^2 < 1$ (حيث إنه لأى قيمة تأخذها z في N^g يوجد تقييد $|z| < c^2 / g$)، يكون لدينا بالنسبة للزمن الإحداثى dt (فى نطاق الحدود المتناسبة مع c^{-2}):

$$dt \approx \left(1 - \frac{gz_A}{c^2}\right) d\tau_A = \left(1 - \frac{gz_B}{c^2} - \frac{gr}{c^2}\right) d\tau_A .$$

ومن ثم، بالنسبة للسرعة الابتدائية c_B^g عند B كما تُرى الإشارة من A نحصل على:

$$c_B^g = c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2}\right)\left(1 - \frac{gz_B}{c^2} - \frac{gr}{c^2}\right) .$$

أو، بالإبقاء فقط على الحدود المتناسبة مع c^{-2}:

$$c_B^g = c\left(1 - \frac{gr}{c^2}\right) . \qquad (7.10)$$

وبناء على ذلك، فإن المراقب عند A سوف يحدد أن الإشارة الضوئية تتبعث عند B بسرعة (٧,١٠)، وأثناء زمن رحلتها نحو A (بعيدا عن سطح الأرض) سوف *تتسارع* بتسارع g وستصل إلى A بسرعة مساوية تماما لـ c.

وبالنسبة للسرعة الحقيقية المتوسطة $c_{BA}^{-g} = \frac{1}{2}(c_B^g + c)$ لضوء منتشر من B إلى A كما يُرى من A يكون لدينا

$$c_{BA}^{-g}(\text{as seen from } A) = c\left(1 - \frac{gr}{2c^2}\right). \qquad (7.11)$$

وبما أن السرعة الموضعية للضوء عند A (مقاسة عند A) هى c، ينتج أنه إذا كانت الإشارة الضوئية تنتشر من A نحو B فإن سرعتها الابتدائية عند A تكون c، وسرعتها النهائية عند B تكون (٧,١٠)، وبذلك، كما تُرى من A، تتعرض لتسارع سالب g يؤدى إلى تباطؤها كلما "سقطت" في مجال جاذبية الأرض. يوضح هذا أن مقدار السرعة الحقيقية المتوسطة c_{BA}^{-g} (كما تُرى من A) لإشارة ضوئية منبعثة عند A بسرعة ابتدائية c وتصل عند B بسرعة نهائية (٧,١٠)، سوف يكون مساويا لمقدار السرعة الحقيقية المتوسطة c_{BA}^{-g} (كما تُرى من A) لإشارة ضوئية منتشرة من B نحو A. وهكذا فإن مقداري السرعة الحقيقية المتوسطة إلى الأمام وإلى الخلف لإشارة ضوئية تنتقل بين A وB، عندما تُرى من A، يكونان متساويين.

والآن دعنا نحدد سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة بين B و A بالنسبة لنقطة B. بالنسبة لإشارة ضوئية منبعثة عند B تكون سرعتها (الموضعية) الابتدائية هناك، كما ترى من B، هى c، وتكون السرعة النهائية للإشارة عند A، كما ترى من B، هى

$$c_A^g = \frac{\mathrm{d}z_A}{\mathrm{d}\tau_B} = \frac{\mathrm{d}z_A}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau_B} .$$

حيث $dz_A / dt = c^g(z_A)$ هى سرعة الضوء الإحداثية عند A.

$$c^g(z_A) = c\left(1 + \frac{gz_A}{c^2}\right) .$$

و $d\tau_B$ هو الزمن الحقيقى عند B.

$$\mathrm{d}\tau_B = \left(1 + \frac{gz_B}{c^2}\right)\mathrm{d}t .$$

إذن، حيث $z_A = z_B + r$ ، نحصل بالنسبة لسرعة الضوء عند A، كما تحدد من B، على

$$c_A^g = c\left(1 + \frac{gr}{c^2}\right) . \qquad (7.12)$$

باستخدام (٧,١٢) تصبح معادلة السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء منتشر من B إلى A كما يحدد من B على الصورة

$$c_{BA}^g(\text{as seen from } B) = c\left(1 + \frac{gr}{2c^2}\right) . \qquad (7.13)$$

إذا انتشرت إشارة ضوئية من A إلى B فإن مقدار سرعتها الحقيقية المتوسطة c_{AB}^{-g} (كما تُرى من B) سوف يساوى c_{BA}^{-g} (كما تُرى من B) – أى مقدار السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء منتشر من B إلى A. هذا يوضح أنه بالنسبة لمراقب عند B تتسارع إشارة ضوئية منبعثة من B بسرعة c متجهة نحو A بتسارع g وتصل هناك بسرعة نهائية (٧,١٢). وبناء على تحديد المراقب B فإن الإشارة الضوئية المنبعثة من A بسرعة ابتدائية (٧,١٢) سوف تتباطأ (بتسارع g–) كلما "هبطت" في مجال جاذبية الأرض،

وسوف تصل عند B بسرعة نهائية مساوية تماما للمقدار c. وبذلك سوف يتفق المراقب عند B مع المراقب عند A في أن الإشارة الضوئية سوف تتباطأ أثناء "هبوطها" في مجال جاذبية الأرض خلال فترة انتشارها من A إلى B، ولكنهما لن يتفقا على سرعة الضوء عند النقطتين A و B.

توضح مقارنة المعادلتين (٧,١١) و(٧,١٣) أن السرعتين الحقيقيتين المتوسطتين بين النقطتين نفسها A و B غير متساويتين وتعتمدان على موضع قياسهما. وكما هو متوقع، فإن الحقيقة التى تقضى بأن السرعة الموضعية للضوء عند نقطة الإسناد هى c تجعل السرعة الحقيقية المتوسطة بين النقطتين معتمدة على موضع نقطة الإسناد. والنتيجة المستخلصة هنا هى أن التأخر الزمنى لشابيرو لا يعنى دائما أن الضوء يستغرق، لكى يقطع مسافة معينة في مجال جاذبية موازٍ، زمنا أكبر من الزمن المطلوب في إطار إسناد قصورى.

فى حالة مجال جاذبية مواز، بالنسبة لإشارة ضوئية تنتشر في رحلة دائرية بين A و B ويتم تحديدها من النقطة A سوف يكون التأثر الزمنى لشابيرو في حقيقة الأمر ظاهرة تأخر على الصورة

$$\Delta\tau_A = \frac{2r}{c(1-gr/2c^2)} \approx \Delta t_{\text{inertial}}\left(1+\frac{gr}{2c^2}\right).$$

حيث $\Delta t_{flat} = 2r/c$ هو زمن رحلة الضوء الدائرية بين A و B في إطار لاقصورى. لكن المراقب عند B سوف يحدد أن الإشارة الضوئية تستغرق زمنا أقل لإكمال الرحلة الدائرية بين A و B:

$$\Delta\tau_B = \frac{2r}{c(1+gr/2c^2)} \approx \Delta t_{\text{inertial}}\left(1-\frac{gr}{2c^2}\right).$$

من ناحية أخرى، طبقا لمقياس شوارزتشايلد، يكون تأثير شابيرو دائما ظاهرة تأخر، لأن مقدار السرعة الحقيقية المتوسطة للضوء في ذلك المقياس يكون دائما أقل من c، على نحو ما هو موضح في قسم ٧,٥.

يمكن الحصول أيضا على سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة بين A و B باستخدام سرعة الضوء الإحداثية المتوسطة (٧,٩) بين النقطتين نفسها:

$$c^g_{AB} \equiv \frac{r}{\Delta t} = c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2} + \frac{gr}{2c^2}\right) .$$

دعنا نحسب السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء منتشر بين A و B، كما يُحدَّد من نقطة A. هذا يعنى أننا سوف نستخدم زمن A الحقيقى:

$$\bar{c}^g_{AB}(\text{as seen from } A) = \frac{r}{\Delta\tau_A} = \frac{r}{\Delta t}\frac{\Delta t}{\Delta\tau_A} .$$

بملاحظة أن $r/\Delta t$ هى السرعة الإحداثية المتوسطة (٧,٩)، وأيضا ملاحظة أن $z_A = z_B + r$ يكون لدينا (فى نطاق الحدود المتناسبة مع c^{-2}) المعادلة:

$$\bar{c}^g_{AB}(\text{as seen from } A) \approx c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2} + \frac{gr}{2c^2}\right)\left(1 - \frac{gz_A}{c^2}\right) \approx c\left(1 - \frac{gr}{2c^2}\right) .$$

التى تتطابق مع (٧,١١).

حساب السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء منتشر بين A و B، لكنه يُرى من B، يعطى المعادلة نفسها مثل (٧,١٣):

$$\begin{aligned}\bar{c}^g_{AB}(\text{as seen from } B) &= \frac{r}{\Delta\tau_B} = \frac{r}{\Delta t}\frac{\Delta t}{\Delta\tau_B} \\ &\approx c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2} + \frac{gr}{2c^2}\right)\left(1 - \frac{gz_B}{c^2}\right) \\ &\approx c\left(1 - \frac{gr}{2c^2}\right)\end{aligned}$$

يتضح من المعادلتين (٧,١١) و (٧,١٣) أن السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء منبعث من مصدر مشترك ومحدد عند نقاط مختلفة حول المصدر تكون غير متماثلة اتجاهيا في N^g – إذا كانت نقطة المراقبة تقع فوق مصدر الضوء تكون سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة أقل قليلا من c وأقل من السرعة الحقيقية المتوسطة التى يتم تحديدها من نقطة مراقبة أسفل المصدر. إذا كانت المراقب عند B (انظر شكل ٧,٢) يحدد السرعتين الحقيقيتين المتوسطتين لضوء يأتى من A و C، فإنه سوف يجد أنهما أيضا غير متماثلين اتجاهيا – السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء منبعث من A تكون أكبر من نظيرتها للضوء المنبعث من C، ولهذا فإن الضوء المنبعث من A سوف يصل إلى B قبل الضوء المنبعث من C (بشرط أن تكون الإشاراتان الضوئيتان منبعثتين آنيا من A و C في N^g). لكن إذا كان المراقب عند B (شكل ٧,٢) يحدد مقداريْ السرعة الحقيقية المتوسطة ذهابا وإيابا للضوء المنتشر بين A و B، فإنه يجد أنهما متساويان (مقدارا السرعتين الحقيقيين المتوسطين للضوء ذهابا وإيابا بين B و C متساويان أيضا).

دعنا الآن نحصل على سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة في صورة متجهية، سوف نحتاج إليها في الفصلين الثامن والتاسع. اعتبر مصدر ضوء عند نقطة B. ليكن الضوء المنبعث من B ملاحَظًا عند نقاط مختلفة تقع على كرة نصف قطرها r ومركزها B.

لحساب السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء منتشر من B وتتم مراقبته عند نقطة P على كرة (أى كما يُرى من P)، علينا أن نحدد السرعة الابتدائية لإشارة ضوئية عند B وسرعتها النهائية عند P، كلتاهما بالنسبة إلى P. بما أن السرعة الموضعية للضوء هى c، فإن من الواضح أن تكون السرعة

النهائية لإشارة ضوئية محددة عند P هـي c. وبمـا أن المـسافة الحقيقيـة والمسافة الإحداثية متساويتان في مجال جاذبية موازٍ، فإنـه يمكننـا تحديـد السرعة الابتدائية للإشارة الضوئية عند B كما تُرى من P:

$$c_B^g = \frac{\mathrm{d}r_B}{\mathrm{d}\tau_P} = \frac{\mathrm{d}r_B}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau_P} .$$

حيث $dr_B / dt = c^g(z_B)$ هى السرعة الإحداثية للضوء عند B. ولبيان أن الـسرعة الإحداثيـة للـضوء عنـد B هـى دالـة فـي z، دع $dr^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$. عندئذ تكون الفترة هى

$$\mathrm{d}s^2 = \left(1 + \frac{2gz}{c^2}\right) c^2\mathrm{d}t^2 - \mathrm{d}r^2 .$$

واضح أن السرعة الإحداثية عند B:

$$c^g(z_B) = c\left(1 + \frac{gz_B}{c^2}\right) .$$

ويكون الزمن الحقيقى $d\tau_P$ عند P هو:

$$\mathrm{d}\tau_P = \left(1 + \frac{gz_P}{c^2}\right)\mathrm{d}t .$$

يمكـن أن نعتبـر z_P بدلالـة z_B والمـسافة بـين B وP: حيـث $z_P = z_B - r\cos\theta$ هى الزاوية بين خط طوله r يصل بين P و B. وعجلـة (تسارع) الجاذبية g. وبما أن نقطة P يمكن وضعها في أى مكان على الكرة، يكون لدينا:

$$z_P = z_B - r\cos\theta = z_B - \hat{\mathbf{g}}\cdot\mathbf{r}_P .$$

حيث $\hat{\mathbf{g}}$ متجه وحدة في اتجاه $\mathbf{g}$، أى أن $\hat{\mathbf{g}}=\mathbf{g}/g$، و $\mathbf{r}_P$ متجه موضع (أصله عند B) يحدد موضع P، وينتج أن:

$$\mathrm{d}\tau_P = \left(1+\frac{gz_P}{c^2}\right)\mathrm{d}t = \left(1+\frac{gz_B}{c^2}-\frac{g\hat{\mathbf{g}}\cdot\mathbf{r}_P}{c^2}\right)\mathrm{d}t$$

$$= \left(1+\frac{gz_B}{c^2}-\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}_P}{c^2}\right)\mathrm{d}t\ .$$

وبما أن $gz_B/c<1$ و $\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}_P/c^2<1$، فإنه بالنسبة لزمن إحداثى dt يكون لدينا (فى نطاق حدود متناسبه مع c^{-2}):

$$\mathrm{d}t \approx \left(1-\frac{gz_B}{c^2}+\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}_P}{c^2}\right)\mathrm{d}\tau_P\ .$$

وعندئذ لايجاد السرعة الابتدائية c_B^g عند B كما تُرى من P نحصل على:

$$c_B^g = c\left(1+\frac{gz_B}{c^2}\right)\left(1-\frac{gz_B}{c^2}+\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}_P}{c^2}\right)\ .$$

أو، بالإبقاء فقط على الحدود المتناسبة مع c^{-2}،

$$c_B^g = c\left(1+\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}_P}{c^2}\right)\ .$$

وبالنسبة للسرعة الحقيقية المتوسطة $\bar{c}_{BP}^{\,g}=\frac{1}{2}(c_B^g+c)$ لضوء منتشر من B إلى P كما يُرى من P، يكون لدينا

$$\bar{c}_{BP}^{\,g} = c\left(1+\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}_P}{2c^2}\right)$$

أو ببساطة

$$\bar{c}^{\,g} = c\left(1+\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right)\ . \qquad (7.14)$$

حيث تحدد r النقطة التى تحسب منها السرعة المتوسطة.

حساب السرعة الحقيقية المتوسطة لضوء فى إطار متسارع N^a يعطى

$$c^a_{BA}\,(\text{as seen from } A) = c\left(1 - \frac{ar}{2c^2}\right)$$

و

$$c^a_{BA}\,(\text{as seen from } B) = c\left(1 + \frac{ar}{2c^2}\right).$$

حيث $a=|\mathbf{a}|$ هو التسارع الحقيقى للإطار معادلة سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة في صورة متجهية، نحصل على:

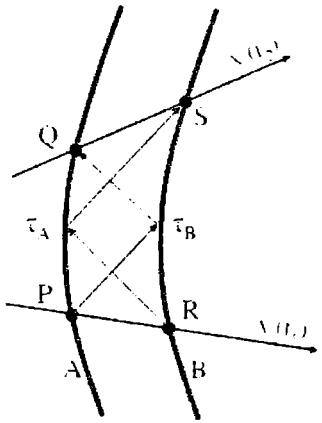
$$\bar{c}^a = c\left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right). \qquad (7.15)$$

بالتعويض عن $\mathbf{a}=-\mathbf{g}$ في (٧,١٥) تنتج المعادلة (٧,١٤)، وهو المطلوب طبقا لمبدأ التكافؤ. سرعتا الضوء الحقيقيتان المتوسطتان (٧,١٤) و(٧,١٥) تم استنتاجهما مستقلتين وهما تخضعان لمبدأ التكافؤ. وهذا يشير إلى أن تطابق اللاتماثل في الخواص اتجاهيا بالنسبة لانتشار الضوء في أُطر إسناد لاقصورية يمكن أن يكون له أصل مشترك. والواقع أن ما يسبب الانتشار غير المتماثل اتجاهيا والمتطابق في إطار إسناد متسارع N^a وفى الإطار N^g لمراقب ساكن في مجال الجاذبية هى حقيقة أن تشوه الخطوط الكونية لجميع الأجسام الساكنة في N^a يكون مطابقا لتشوه الخطوط الكونية للأجسام الساكنة في N^g. بصياغة أخرى، تنحرف الخطوط الكونية للأجسام الساكنة في N^a عن أشكالها الجيوديسية (أى عن أشكالها المستقيمة في زمكان مسطح) بقدر ما تحيد الخطوط الكونية للأجسام الساكنة في N^g عن شكلها الجيوديسى في زمكان منحنٍ.

لكى ترى ما يجب أن يفعله شكل الخطوط الكونية للأجسام في N^a وN^g مع انتشار الضوء هناك، اعتبر مراقبين A و B ساكنين في N^a، كما هو مبين في شكل ٧,٣. كما رأينا في الفصل الرابع، الأفضية اللحظية لإطار الإسناد

اللاقصورى، المناظرة للحظات زمنية مختلفة في ذلك الإطار لا تكون متوازية. في شكل ٧,٣، الفضاءان الآنيان الممثلان بخطيْ تزامن $x(t_1)$ و $x(t_2)$ ليسا متوازيين. خطّا التزامن "يقطعان" قطعتين مختلفتين PQ و RS من الخطين الكونيين A و B على التوالى. وكما يظهر في شكل ٧,٣، PQ أقصر من RS، مما يعنى أن الزمن الحقيقى τ_{PQ} لمراقب A أقصر من الزمن الحقيقى τ_{RS} لمراقب B (لأن الزمن الحقيقى يتناسب مع طول الخط الكونى شبه الزمني).

يحدد كل مراقب قيم مختلفة لسرعة الضوء الحقيقية المتوسطة نظرا لاختلاف الأزمنة الحقيقية لكل منهما. في شكل ٧,٣، عند الحدث P، يرسل المراقب A إشارة ضوئية نحو B، حيث تنعكس الإشارة وتصل بعد زمن حقيقى τ_{PQ} إلى A عند الحدث Q. يؤدى B التجربة نفسها، ويجد أن الإشارة الضوئية المنبعثة عند R تستغرق وقتا أطول لتعود إلى S، حيث $\tau_{RS} > \tau_{PQ}$.



شكل ٧,٣ مراقبان متسارعان A و B يمثلهما خطّاهما الكونيان. يرسل المراقب A إشارة ضوئية نحو B عند حدث P ويستقبلها مرتدة عند حدث Q بعد أن تكون الإشارة قد انعكست من B. يؤدى B التجربة نفسها – يرسل المراقب B الإشارة الضوئية عند R ويستقبلها عند S.

بإجراء هذه التجربة يستطيع A و B أيضا تحديد أن $x(t_1)$ و $x(t_2)$ يكونان خطّي تزامن في N^a. لكن المراقبين في هذه الحالة لا يستخدمان السرعة الحقيقية المتوسطة للضوء، وإنما يستخدمان سرعته الإحداثية المتوسطة – ولأن تلك السرعة واحدة في كلا الاتجاهين (من A إلى B والعكس بالعكس)، ينتج أن الضوء يستغرق الزمن الإحداثي نفسه لكي ينتقل من A إلى B ومن B إلى A. ولهذا فإن الانبعاث المتزامن لإشارتيْ الضوء عند الحدثين P و Q يحدد خط التزامن $x(t_1)$، والوصول المتزامن للإشارتين عند Q و S (حيث إن كل إشارة ضوئية تستغرق الزمن الإحداثي نفسه لإتمام الرحلة الدورية) يحدد خط التزامن $x(t_1)$. واستنادًا إلى حقيقة أن سرعة الضوء الإحداثية المتوسطة بين نقطتين تكون واحدة في كلا الاتجاهين، فإنه ليس ضروريا أن نجعل الإشارتين الضوئيتين تنتقلان في كلا الاتجاهين كما في شكل ٧,٣، ويكفى أن تقطع الإشارتان المسافة بين المراقبين مرة واحدة فقط، كما هو مبين في شكل ٤,٢٨.

تخيل الآن أن ما هو موصوف في شكل ٧,٣ هما مراقبان في N^a. سيحدث الشئ نفسه تماما. الخطان الكونيان للمراقبين A و B يشوّهان (ينحنيان) لأنهما انحرفا عن شكليهما الجيوديسيين. لاحظ أن انحناء الخطين الكونيين لكل من A و B ليس بسبب انحناء الزمكان. تشوّه الخطان الكونيان بمعنى أنهما انحرفا عن شكليهما الجيوديسيين. وانحناء الزمكان يسبب الانحناء "الطبيعى" لخطيْ A و B الكونيين والجيوديسيين إذا كانا هابطين في مجال جاذبية. من ناحية أخرى، طالما أن A و B ممنوعان من السقوط لكونهما معلقين في مجال جاذبية، فإن خطيهما الكونيين يكونان منحنيين، ليس بسبب انحناء الزمكان، ولكن بسبب العوائق التى تحرفهما عن مساريهما الجيوديسيين والمنحنيين "طبيعيا" (بانحناء الزمكان). من الواضح أن ما يحنى الخطين الكونيين للمراقبين المتسارعين A و B الموصوفين في شكل ٧,٣ هما الصاروخان المسرِّعان لإطارهما N^a.

خطّا A و B الكونيان الساكنان في N^a ينحرفان عن شكليهما الجيوديسيين (المستقيمين) بقدر ما ينحرف الخطان الكونيان المراقبين نفسها، عندما يكونان ساكنين في N^g، عن شكليهما الجيوديسيين في زمكان منحنٍ. هذا هو التشوه المتطابق لخطيْ المراقبين الكونيين الذى يسبب الانتشار المتطابق واللاتماثل في N^a و N^g. وإذا أجريت تجارب آلية (ميكانيكية) في N^a و N^g فسوف يكون لها العائد نفسه من النتائج بسبب التشوه الحادث نفسها للخطوط الكونية الخاصة بالأجسام التي شملتها هذه التجارب في N^a و N^g.

لقد ناقشنا حتى الآن الانتشار اللامتماثل اتجاهيا للتآثرات الكهرومغناطيسية في N^a و N^g. لكن، ماذا عن التآثرات الأساسية الأخرى؟ كلما انتشرت حاملات التآثرات القوية، الجليونات، بسرعة الضوء، كانت سرعاتها المتوسطة اللامتماثلة اتجاهيا في N^a و N^g هى:

$$c_S^a = c\left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right).$$

$$c_S^g = c\left(1 + \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right).$$

حاملات التآثرات الضعيفة لها كتل غير صفرية، ولهذا فإنها تنتشر بسرعة أقل. لكن سرعاتها الحقيقية المتوسطة اللاتماثلية اتجاهيا يمكن استنتاجها بالطريقة نفسها التى استنتجت بها سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة.

وبما أن الانتشار المتطابق اللامتماثل اتجاهيا للتآثرات الكهرومغناطيسية، القوية والضعيفة في N^a و N^g ينشأ بسبب التشوه المتساوى

للخطوط الكونية الخاصة بالجسيمات التى تشملها هذه التآثرات في N^a و N^g، فربما يبدو أن هذا التشوه المتساوى هو الذى يكمن وراء مبدأ التكافؤ.

٧,٥ التأخر الزمنى لشابيرو

على الرغم من الاعتراف بأن تباطؤ الضوء (التأخر الزمنى لشابيرو) ينشأ عن السرعة المخفَّضة (المختزلة) reduced velocity للضوء في مجال جاذبية [٩٧، ص ص ١٩٦، ١٩٧]. فإنه لم يتم حتى الآن استنتاج معادلة لسرعة الضوء المتوسطة، والآن سوف نرى أن إدخال سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة سوف يتيح حساب هذا التأثير باستخدام هذه السرعة. إن السرعة الحقيقية المتوسطة للضوء هى المطلوبة في التأخر الزمنى لشابيرو، حيث إن الزمن المقاس في هذا التأثير هو الزمن الحقيقى عند نقطة معينة معطاة.

سوف نتابع معالجة التأخر الزمنى لشابيرو في [٩٧، قسم ٤,٤]. تنبعث إشارة ضوئية (فى الحقيقة، راديوية) من الأرض (عند $z_1 < 0$) وتنتشر في مجال جاذبية الشمس، قبل أن تنعكس بواسطة الكوكب الهدف (عند $z_2 > 0$) وتعود إلى الأرض. مسار الإشارة الضوئية (الموازى للمحور z) يتم تقريبه لخط مستقيم [٩٧، ص ١٩٦]. المسافة بين هذا الخط والشمس (على طول المحور x) هى b. الزمن الحقيقى الكلى بدءًا من انبعاث الإشارات الضوئية حتى عودتها إلى الأرض هو [٩٧، ص ص١٩٧، ١٩٨]:

$$\Delta\tau = 2\left(1-\frac{2GM_\odot}{c^2\sqrt{z_1^2+b^2}}\right)\left(\frac{z_2+z_1}{c}+\frac{2GM_\odot}{c^3}\ln\frac{\sqrt{z_2^2+b^2}+z_2}{\sqrt{z_1^2+b^2}-z_1}\right). \tag{7.16}$$

بما أن المسافة التقريبية بين الأرض (عند $z_1 < 0$) والكوكب الهدف (عند $z_2 > 0$) هى $z_2 + |z_1|$، فإنه يمكننا تعريف السرعة الحقيقية المتوسطة للإشارة الضوئية التى تقطع هذه المسافة كما تُحدَّد على الأرض:

$$c^g_{Earth} = \frac{z_2 - z_1}{\Delta\tau_{Earth}} = \frac{z_2 - z_1}{\Delta t}\frac{\Delta t}{\Delta\tau_{Earth}}$$
$$= c^g_{Sat} \frac{1}{1 - \frac{2GM_\oplus}{c^2\sqrt{z_1^2 + b^2}}} . \qquad (7.17)$$

حيث $c^g_{Sat} = (z_2 + |z_1|)/\Delta t$ هى سرعة الضوء الإحداثية المتوسطة، ويكون الزمن الحقيقى كما يقاس على الأرض، ونحصل عليه من مقياس شوارزتشايلد (بإهمال تأثير مجال جاذبية الأرض)، هو

$$\Delta\tau_{Earth} = \left(1 - \frac{2GM_\oplus}{c^2\sqrt{z_1^2 + b^2}}\right)\Delta t$$

رأينا في قسم ٧,٣ أن السرعة الإحداثية المتوسطة c^g_{Sat} يمكن حسابها كمتوسط إما على الزمن أو على المسافة، ويكون

$$c^g_{Sat} = \frac{1}{z_2 - |z_1|}\int_{-|z_1|}^{z_2} c'(z)dz .$$

حيث

$$c'(z) = c\left(1 - \frac{2GM_\odot}{c^2\sqrt{z^2+b^2}}\right)$$

هى سرعة الضوء الإحداثية عند نقطة في حالة مقياس شوارزتشايلد. عندئذ يكون

$$\begin{aligned} c^{\text{eff}}_{z_1 z_2} &= \frac{c}{z_2 + z_1}\int_{z_1}^{z_2}\left(1 - \frac{2GM_\odot}{c^2\sqrt{z^2+b^2}}\right)\mathrm{d}z \\ &= \frac{c}{z_2 + z_1}\left(z_2 - |z_1| - \frac{2GM_\odot}{c^2}\ln\frac{\sqrt{z_2^2+b^2}+z_2}{\sqrt{z_1^2+b^2}-z_1|}\right) \\ &= c\left[1 - \frac{2GM_\odot}{c^2(z_2+|z_1|)}\ln\frac{\sqrt{z_2^2+b^2}+z_2}{\sqrt{z_1^2+b^2}-z_1}\right]. \end{aligned}$$

بالتعويض بهذه المعادلة في المعادلة (٧,١٧) لسرعة الضوء الإحداثية المتوسطة نستطيع الحصول على سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة في مقياس شوارزتشايلد كما يُرى من الأرض:

$$c^{\text{eff}}_{z_1 z_2} = \frac{c}{1 - \dfrac{2GM_\odot}{c^2\sqrt{z_1^2+b^2}}}\left[1 - \frac{2GM_\odot}{c^2(z_2+|z_1|)}\ln\frac{\sqrt{z_2^2+b^2}+z_2}{\sqrt{z_1^2+b^2}-|z_1|}\right]$$

أو

$$c^{\text{eff}}_{z_1 z_2} \approx \left[1 + \frac{2GM_\odot}{c^2\sqrt{z_1^2+b^2}} - \frac{2GM_\odot}{c^2(z_2+|z_1|)}\ln\frac{\sqrt{z_2^2+b^2}+z_2}{\sqrt{z_1^2+b^2}-|z_1|}\right]$$

ويكون الزمن الحقيقى الكلى

$$\Delta\tau = \frac{2(z_2 - |z_1|)}{c\bar{g}_{zz}(\text{as seen from Earth})} .$$

ومن انبعاث الإشارة الضوئية حتى وصولها عائدة إلى الأرض يكون لدينا

$$\Delta\tau = \frac{2(z_2 - |z_1|)\left(1 - \frac{2GM_*}{c^2\sqrt{z_1^2 + b^2}}\right)}{c\left[1 - \frac{2GM_*}{c^2(z_2 - |z_1|)}\ln\frac{\sqrt{z_2^2 + b^2} + z_2}{\sqrt{z_1^2 + b^2} - |z_1|}\right]}$$

$$\approx 2\left(1 - \frac{2GM_*}{c^2\sqrt{z_1^2 + b^2}}\right)\left(\frac{z_2 + |z_1|}{c} + \frac{2GM_*}{c^3}\ln\frac{\sqrt{z_2^2 + b^2} + z_2}{\sqrt{z_1^2 + b^2} - |z_1|}\right) .$$

وتكون المعادلة (٧,١٦) قد استردت. ويمكن أيضا كتابة الزمن الحقيقى الكلى (في نطاق الحدود المتناسبة مع c^{-2}) على الصورة.

$$\Delta\tau \approx 2\left[\frac{z_2 - |z_1|}{c} - \frac{2GM_*(z_2 + |z_1|)}{c^3\sqrt{z_1^2 + b^2}} + \frac{2GM_*}{c^3}\ln\frac{\sqrt{z_2^2 + b^2} - z_2}{\sqrt{z_1^2 + b^2} - |z_1|}\right]$$

٧,٦ سبْر سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيا بواسطة تجربة أرضية

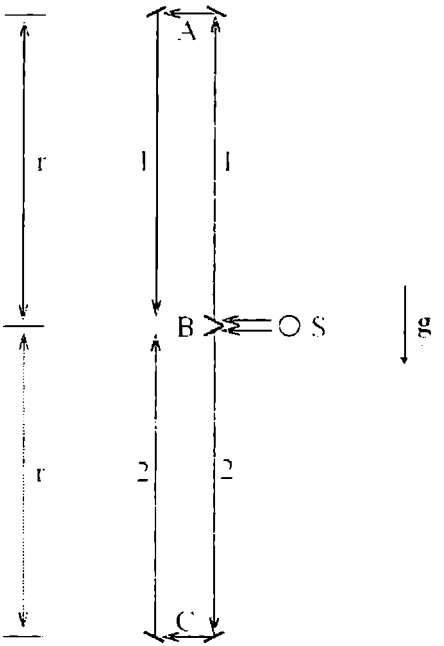
نقترب من الاحتفاء بذكرى مرور مائة عام على اكتشاف النسبية العامة ولاتزال هناك صعوبة في الإجابة على السؤال الافتراضى الآتى:

"ما هى سرعة الضوء المتوسطة بين نقطتين بعيدتين في مجال جاذبية (أو في إطار إسناد لاقصوري بصورة عامة)؟ "لماذا يوجد مثل هذا القلق والتردد بشأن الإقرار صراحة بأن مثل هذه السرعة ليست هى c؟ مقدار سرعة الضوء ثابت في أُطر الإسناد القصورية. وهذا يتسق تماما مع حقيقة

أنه لا يوجد إطار قصورى مفضل – إذا لم يكن مقدار سرعة الضوء ثابتا واحدا في جميع أُطر الإسناد القصورية، فإننا نستطيع أن نكتشف مثل هذا الإطار المفضل. لكننا نستطيع اكتشاف أن إطارًا ما يكون متسارعا باستخدام إشارات ضوئية كما في مصعد آينشتين المتسارع، على سبيل المثال (شكل ٧,١). وبهذا، حتى في النسبية الخاصة، لا تكون السرعة المتوسطة للضوء ثابتة في أُطر الإسناد المتسارعة (لكن سرعة الضوء اللحظية، المقاسة عند تلك النقطة، تكون c دائمًا). وهكذا، كما رأينا لا تكون السرعة المتوسطة للضوء ثابتة أيضا في مجال جاذبية.

وعلى الرغم من الحقيقة التى تقضى بأن تأثير شابيرو هو في واقع الأمر مظهر تأييد اللاتماثل في الخواص اتجاهيا بالنسبة لانتشار الضوء في مجال جاذبية، دعنا نعتبر تجربة فكرية يمكن استخدامها من حيث المبدأ لاختبار سرعة الضوء اللامتماثلة في ظروف أرضية.

التجربة موضحة بالرسم في شكل ٧,٤. مرة ثانية، اعتبر أن مصعد آينشتين ساكن في مجال جاذبية الأرض (شكل ٧,٢)، وتخيل تجربة يكون فيها الضوء والمرايا بالترتيب الموضح في شكل ٧,٤. عند نقطة B، تنشطر حزمة ضوئية منبعثة من مصدر S إلى شعاعين ١ و٢ ينتشران رأسيا (بالنسبة لسطح الأرض). الشعاع ١ يقطع المسافة r إلى أعلى من B إلى A؛ وعند A تعكسه مرآة فيعود إلى B. الشعاع ٢ أيضا يقطع المسافة نفسها r ولكن إلى أسفل من B إلى C، ثم يعود بعد أن تعكسه مرآة عند C. يتداخل الشعاعان ١ و٢ عند وصولهما إلى النقطة B. إذا كانت السرعة المتوسطة للضوء لا متماثلة اتجاهيا، فإن نموذج التداخل الناتج بواسطة الشعاعية المنتشرين رأسيا سوف يختلف عن نموذج تداخل شعاعين منتشرين أفقيا (إذا ما أجريت التجربة على النحو الذى يكون فيه انتشار الشعاعين ١ و ٢ أفقيا).



شكل ٧,٤ الانتشار الرأسي لإشارات ضوئية يمكن استخدامه من حيث المبدأ في تجربة أرضية لقياس السرعة المتوسطة اللامتماثلة اتجاهيا لضوء في مجال جاذبية شدته g. عند نقطة A، ينشطر شعاع ضوئي منبعث من مصدر S إلى شعاعين ١ و٢ ينتشران نحو نقطتين A و C على الترتيب، حيث ينعكسان هناك بواسطة مرآتين. وبعد أن يعود الشعاعان الضوئيان إلى B يتداخلان عند B. يتأخر الشعاع الضوئي ٢ عند وصوله إلى B بمقدار $\delta t = (2gr^2/c^3)$ بالنسبة للشعاع ١ القادم من A. وسبب التأخر هو أن سرعة الشعاع ٢ في طريقه من B إلى C وعودته إلى B تكون أقل من سرعة الشعاع ١.

ما يسبب نموذج التداخل المختلف في شكل ٧,٤ هو الوصول غير المتزامن للشعاعين عند B بسبب السرعتين المتوسطتين المختلفتين للضوء بين الحدثين B و A وبين B و C. وبما أن قياس زمنيْ الوصول للشعاعين ١

و ٢ يكون عند B، فإنه يمكن استخدام الزمن الحقيقى عند B. هذا يعنى، كما في حالة تأثير شابيرو، أنه يجب استخدام السرعة الحقيقية المتوسطة للضوء لحساب زمنيْ انتقال الشعاعين ١ و٢.

يمكن استخدام المعادلة (٧,١٣) لحساب السرعة الحقيقية المتوسطة للشعاع الضوئى ١ المنتشر من B إلى A ومن A إلى B كما يحدَّد عند B:

$$\bar{c}^{\,g}_{AB}\text{ as seen from }B = \bar{c}^{\,g}_{BA}\text{ as seen from }B = c\left(1-\frac{gr}{2c^2}\right). \qquad (7.18)$$

وباستخدام المعادلة (٧,١١) يمكن حساب السرعة الحقيقية المتوسطة للشعاع الضوئى ٢ المنتشر من B إلى C ومن C إلى B كما يُرى من B:

$$\bar{c}^{\,g}_{BC}\text{ as seen from }B = \bar{c}^{\,g}_{CB}\text{ as seen from }B = c\left(1-\frac{gr}{2c^2}\right). \qquad (7.19)$$

فى نطاق الحدود المتناسبة مع c^{-2}، يكون الزمن الذى يستغرقه الشعاع ١ في الانتشار مسافة 2r من B إلى A والعودة إلىB هو [مع استخدام المفكوك $(1\pm x)^{-1}=1\mp x+\ldots$]

$$\Delta t_{AB}=\frac{r}{\bar{c}_{AB}}-\frac{r}{\bar{c}_{BA}}=\frac{2r}{\bar{c}_{AB}}\approx\frac{2r}{c}\left(1-\frac{gr}{2c^2}\right)$$

الشعاع ٢ يقطع المسافة 2r من B إلى C والعودة إلى B التى تستغرق الزمن [مرة ثانية مع استخدام $(1\pm x)^{-1}=1\mp x+\ldots$]:

$$\Delta t_{BC}=\frac{r}{\bar{c}_{BC}}-\frac{r}{\bar{c}_{CB}}=\frac{2r}{\bar{c}_{BC}}\approx\frac{2r}{c}\left(1-\frac{gr}{2c^2}\right).$$

الشعاعان الضوئيان لا يصلان آنيا عند B بسبب سرعة الضوء اللاتماثلية اتجاهيا في مجال جاذبية، ويكون الفرق الزمنى الذى يفصل بين وصولهما هو:

$$\delta t = \Delta t_{BC} - \Delta t_{AB} = \frac{2gr^2}{c^3} .$$

وإذا جعلنا الشعاعين الضوئيين ينتشران المسافة 2r بين B و A وبين B و C لعدد كلى N من المرات بواسطة انعكاسات متعددة، فإن الزمن δt يمكن أن يتضاعف N من المرات:

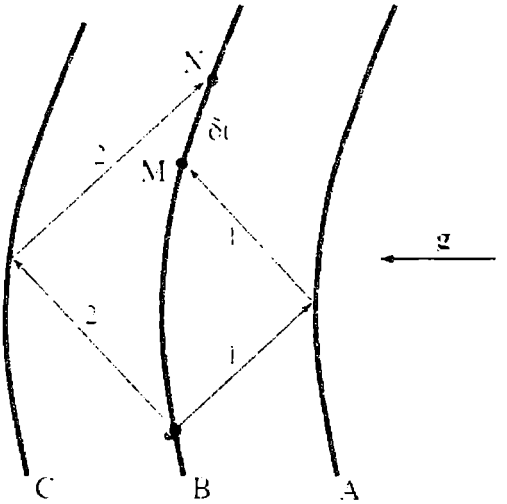
$$\delta t = \frac{2Ngr^2}{c^3} .$$

إن سبب اختلاف سرعتى الشعاعين ١ و ٢ يكون غير واضح إذا لم يؤخذ في الاعتبار بجدية واقعية الخطوط الكونية (وبالأحرى الأنابيب الكونية) للمرآتين A و C وجهاز التداخل عند B، مما يسبب وصولهما غير المتزامن عند B. من ناحية أخرى، تبدو التجربة الفكرية المقترحة واضحة وبيِّنة بذاتها عندما تمثَّل برسم الزمكان المعطى في شكل ٧,٥. بما أن المرآتين عند A و C وجهاز التداخل عند B كلها معلقة في مجال جاذبية الأرض، فإنها تكون ممنوعة من السقوط، مما يعنى أن خطوطها الكونية مشوهة، أى ليست جيوديسية. وكنتيجة لانحناء الخطوط الكونية الثلاثة فإن المراقب عند B سوف يحدد بالقياس أن الشعاع الضوئى ١ يستغرق أقل من زمنه الحقيقى ليقطع ضعف المسافة r من B إلى A والعودة إلى B، مقارنة بالزمن الحقيقى الذى يستغرقه الشعاع ٢ في قطع مسافة 2r من B إلى C والعودة إلى B.

الرسم التخطيطى للزمكان في التجربة الفكرية يتيح إثبات أن السرعتين الحقيقيتين المتوسطتين المختلفتين للشعاعين الضوئيين يسببهما انحناء الخطوط الكونية للمرآتين A و C وللجهاز عند B. وينبغى التأكيد على أن انحناء الخطوط الكونية الثلاثة تسببه العوائق التى تمنع المرآتين والجهاز من الهبوط، وليس بسبب انحناء الزمكان. ذلك أن انحناء الزمكان يسبب الانحناء "العادى" للخط الكونى الجيوديسى لجسم يسقط في مجال جاذبية. الخطان الكونيان لشعاعى الضوء المرسومين في شكل ٧,٥ مستقيمان، ولكنهما يكونان جيوديسيين، وليسا

مستقمين، في زمكان منحنٍ حول الأنبوب الكونى للأرض. من ناحية أخرى، في حالة مجال جاذبية موازٍ، وهو ما نعتبره هنا (فى مصعد آينشتين، يكون مجال الجاذبية في الأغلب موازيا تماما)، تكون الخطوط الكونية المستقيمة تقريبًا جيدًا للخطوط الكونية الجيوديسية للأشعة الضوئية.

واستنادا إلى حقيقة أن انحناء الخطوط الكونية الثلاثة في شكل ٧,٥، وليس انحناء الزمكان، هو الذي يسبب السرعة المتوسطة اللامتماثلة اتجاهيا في الإطار اللاقصورى حيث تجرى هذه التجربة، فإنه سيؤدى إلى النتيجة نفسها في كل من إطار الإسناد المعلق في مجال جاذبية وإطار الإسناد المتسارع.



شكل ٧,٥ رسم الزمكان لتجربة قياس سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيا في مجال جاذبية يوضح السبب في أن الشعاع الضوئى ١ يصل أولا عند B (حدث M)، بينما يصل الشعاع الضوئى ٢ بعده (حدث N). انحناء الخطين الكونيين للمرآتين عند نقطتين A و C وجهاز التداخل عند B هو ما يسبب الوصول غير المتزامن للشعاعين الضوئيين عند B، ومن ثم تبعا لذلك السرعتين الحقيقيتين المتوسطتين كما تقاسان عند موضع B.

٧,٧ حول الانزياح الأحمر الثقالي

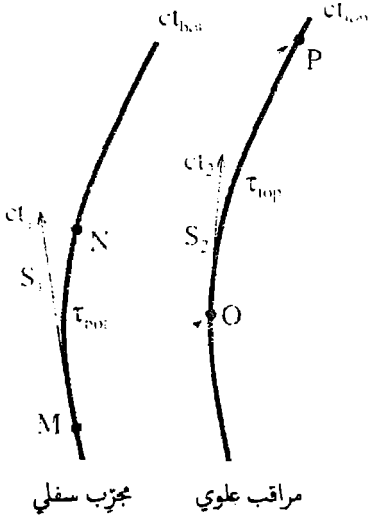
الوجود الفعلى للانزياح الأحمر الثقالي يعتبر الآن بمثابة تأكيد لانحناء الزمكان [٥٦، ص ١٨٩]؛ انظر أيضا [١١١]، من المعتقد أن تجربة الانزياح الأحمر لا يمكن ملاحظتها في الهندسة المسطحة لزمكان مينكوفسكى لأن الزمنين الحقيقين τ_{bot} و τ_{top} لمُجَرِب سُفلى (يبعث إشارات ضوئية) ومراقب علوى (يستقبل الإشارات) في إطار إسناد لاقصورى لا يمكن أن يكونا مختلفين في زمكان مينكوفسكى [٥٦، ص ١٨٩]: "يستطيع المرء مرة ثانية أن يخلص، إذا ما كانت هندسة مينكوفسكى المسطحة محققة، إلى استنتاج أن $\tau_{bot} = \tau_{top}$ ، مناقضًا بذلك تجربة الانزياح الأحمر الملاحظة".

فى حقيقة الأمر، الانزياح الأحمر الثقالي لا يثبت انحناء الزمكان، لأنه موجود أيضا في إطار إسناد متسارع في زمكان مسطح وفى مجال جاذبية موازٍ (متجانس) حيث يكون ممتد ريمانRiemann tensor صفرًا وبهذا لا يوجد انحناء زمكانى. إن ما يثبته تأثير الانزياح الأحمر تحديدا في إطار إسناد متسارع هو أن الخطين الكونيين لمجرِّب سفلى لاقصورى ومراقب علوى لاقصورى يكونان منحنيين في زمكان مسطح؛ إذا كان المجرب والمراقب في زمكانٍ منحنٍ، فإن خطيهما الكونيين يكونان منحنيين هناك – بما أن المجرِّب والمراقب معلّقان في مجال جاذبية، فإن خطيهما الكونيين يكونان مشوهين، وليسا جيوديسيين.

كما هو مبين في شكل ٧,٦، انحناء الخطين الكونيين للمجرب السفلى والمراقب العلوى يفسر سبب اختلاف زمنيهما الحقيقيين τ_{bot} و τ_{top} – انحناء الخطين الكونيين يؤيد نفسه بحقيقة أن الخطين الكونيين المتوازيين لإشارتين ضوئيتين منبعثتين عند حدثين M و N يقطعان جزءين مختلفين MN و OP من الخطين الكونيين للمجرّب والمراقب على الترتيب و $MN < OP$. وبما أن الزمن الحقيقى يتناسب مع طول الخطين الكونيين شبيهَي الزمن لكل من

المجرب والمراقب، فإنه ينتج أن $\tau_{bot} < \tau_{top}$. لكن الخطوط الكونية المنحنية أو المشوهة توجد في كل من الزمكانين المسطح والمنحنى؛ الخط الكونى المشوه في زمكان منحنٍ لا يكون ببساطة جيوديسيا.

كما رأينا للتوّ، انحناء الخطين الكونيين للمجرب والمراقب لا يسببه انحناء الزمكان. بناء على ما سبق مناقشته في القسمين ٧,٤ و٧,٦ تكون الخطوط الكونية المشوهة في زمكان منحنٍ (أى في مجال جاذبية) منحنية، بمعنى أنها تكون منحرفة عن انحنائها "العادى" بسبب انحناء الزمكان؛ أى أنها تكون منحرفة عن شكلها الجيوديسي. ويحدد انحناء الزمكان الانحناء "العادى" للخطوط الكونية الجيوديسية، وهذه ليست خطوطا كونية مشوهة في مثل هذا الزمكان.



شكل ٧,٦ المجرب السفلى (الذى يبعث إشارات ضوئية) والمراقب العلوى (الذى يستقبل الإشارات) يكونان في حالة سكون بالنسبة لبعضها في إطار إسناد لاقصوى N^g. الزمن τ_{bot} بين انبعاث إشارتين ضوئيتين يكون أقصر من الزمن τ_{top} بين وصول الإشارتين نتيجة لانحناء خطيهما الكونيين.

في إطار إسناد متسارع يتم استنتاج وتفسير تأثير الانزياح الأحمر بدلالة تأثير دوبلر. لكن مثل هذا التفسير لا يكشف عن الأصل الحقيقي لهذا التأثير. أولاً، هذا التفسير مطروح في إطار إسناد قصوري، في حين ينبغي طرحه في إطار الإسناد المتسارع نفسه. والسبب طبقا لمبدأ التكافؤ، هو أن ما يلاحظ في مجال إسناد متسارع بتسارع حقيقي a يجب ملاحظته أيضا في إطار لاقصوري لمراقب معلق في مجال جاذبية شدته g=a. وبهذا يربط مبدأ التكافؤ بين الانزياح الأحمر التقالي في كل من إطاري الإسناد اللاقصوريين. ثانيًا، كل من المجرِّب والمراقب ليسا في حالة حركة نسبية، مما يبين أن استخدام تأثير دوبلر لوصف الانزياح الأحمر في إطار متسارع يكون محيرا أكثر. من ناحية أخرى، انحناء الخطين الكونيين لكل من المجرِّب والمراقب يفسر سبب فعالية وصف تأثير دوبلر.

وبما أن الخطين الكونيين للمجرِّب والمراقب منحنيان كما هو مبين في شكل ٧,٦، فإن المجرِّب عند الحدث M عندما يبعث الإشارة الضوئية الأولى، والمراقب عند الحدث الأخير O عندما يستقبل الإشارة، يبدوان في حالة حركة نسبية بالنسبة لمراقب في إطار قصوري S_1 عند حدث M، متحرك بالتلازم لحظيا. وعندما تصل الإشارة الضوئية عند الحدث O، فإن إطارًا قصوريا آخر S_2 متحركا بالتلازم لحظيا سوف يناظر ذلك الحدث. يتضح من شكل ٧,٦ أن محوري الزمن S_1 و S_2 ليسا متوازيين، مما يعني ضمنيا أن الإطارين المتحركين بالتلازم M و O في حالة حركة نسبية. وهذا يمكن تفسيره طبيعيا إذا كان المجرب والمراقب متسارعين – تنبعث الإشارة الضوئية عند M، وخلال الزمن التى تنتشر فيه نحو المراقب يزيد كل من المجرِّب والمراقب سرعتيهما نحو S_1؛ وعندما تصل الإشارة إلى O يكون الإطار القصوري المتحرك بالتلازم عند O في حالة حركة نسبية بالنسبة إلى S_1. لكن الانزياح الأحمر لا يمكن تفسيره بتأثير دوبلر في مجال إسناد لاقصوري N^g لكل من المجرِّب والمراقب لأنهما يكونان في حالة سكون في N^g.

وفي مجال الجاذبية، بما أن الكونيين للمجرِّب والمراقب اللذين يكونان ساكنين بالنسبة لبعضهما منحنيان، فإن خطيْ التماس عند M و O ليسا متوازيين، ويناظر M و O إطارا إسناد قصوريان موضعيان مختلفان S_1 و S_2. ومن الظاهر فقط (عند التعبير بلغة ثلاثية الأبعاد) أن S_1 و S_2 في حالة حركة نسبية(*). وبناء على المناقشة أعلاه، يكون إنحناء الخطين الكونيين للمجرب والمراقب هو الذي يسبب ظاهرة الانزياح الأحمر، ولا يهم ما إذا كان ذلك الانحراف للخطين الكونيين عن شكلهما الجيوديسي يحدث في زمكان مسطح أو منحنٍ.

فضلاً عن ذلك، كما رأينا، الانزياح الأحمر له الأصل نفسه في أي إطار إسناد لاقصوري (متسارع أو مصحوب بمراقب ساكن في مجال جاذبية). ومن ثم لا يمكن القول بأن الانزياح الأحمر الثقالي الملاحظ يكون مستحيلاً في هندسة مينكوفسكي المسطحة، وبالتالي فإنه لا يمكن اعتبار هذه الظاهرة برهانًا على صحة الزمكان المنحني.

وطرح تفسير متكافئ للانزياح الأحمر الثقالي على نحو مبرَّر تمامًا في إطار إسناد متسارع وإطار إسناد لمراقب ساكن في مجال جاذبية إنما يكون بدلالة سرعة الضوء غير المتماثلة اتجاهيًا في هذين الإطارين. من

(*) وجود إطاريْ إسناد قصوريين موضوعين (محليين) في زمكان منحنٍ، S1 و S2 مثلا (يناظران لحظتين من زمنين حقيقيين لمراقبين لاقصوريين ساكنين بالنسبة لبعضهما)، يبدوان في حالة حركة نسبية لأن محوريْ الزمن لكل من S1 و S2 ليسا متوازيين، لايمكن تفسيره إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد. لا تكون الخطوط الكونية للمراقبين واقعية إلا في زمكان واقعي فقط، وخطوط التماس لها (عند كل حدث على خطوطها الكونية) لا تكون متوازية عموما. هذه نتيجة بسيطة لحقيقة أن الخطوط الكونية تكون منحنية. إذا طوّعنا لغتنا اليومية ثلاثية الأبعاد، التي تعكس ما ندركه من المواقف النسبوية عموما، فإننا نصل إلى نتيجة بلا معنى تقضي بأن المراقبين اللاقصوريين الساكنين بالنسبة لبعضهما يبدوان في حالة حركة نسبية.

شأن هذا التفسير أن يوضح بجلاء أكثر أن الانزياح الأحمر الثقالي ليس بسبب انحناء الزمكان. السرعة اللامتماثلة للضوء نفسها في كلا الإطارين تعزى إلى الخطين الكونيين المنحنيين (غير الجيوديسيين) للمجرب والمراقب. إن ما يهم هو انحناء هذين الخطين الكونيين، وليس ما إذا كانا منحنيين في زمكان مسطح أو منحنٍ كما أسلفنا أعلاه. في هذا القسم سوف نستنتج فقط تأثير الانزياح الأحمر الثقالي في إطار إسناد لاقصوري لمراقب ساكن في مجال جاذبية؛ إن استنتاج تأثير الانزياح الأحمر في إطار إسناد متسارع يمكن الحصول عليه بالطريقة نفسها. باعتبار الانتشار غير المتماثل للضوء في أطر إسناد لا قصورية، سوف يكون بإمكاننا:

- توضيح أن تردد الضوء هو الذى يكون ثابتا فى الانزياح الأحمر الثقالي.
- وصف الآلية المسئولة عن تغير طوله الموجى.

عادة ما يفترض أن كلا من التردد والطول الموجى للضوء يتغيران في الانزياح الأحمر الثقالي، بينما تظل سرعته ثابتة. سوف نبين هنا أن تردد الضوء هو الذى لا يتغير، بينما يتغير سرعته وطوله الموجى. سوف يوضّح أيضا أن التغير في السرعة الإحداثية للضوء على طول مساره هو الذى يؤدى إلى التغير في طوله الموجى.

ثلاثة أمور يجب أن تظل باقية في الذهن عند التعامل مع الانزياح الأحمر الثقالي:

- إذا قام مراقبان عند نقطتين مختلفين A و B في مجال جاذبية بتحديد خصائص الضوء المنبعث من ذرات متطابقة موضوعة عند A و B، فإن كل مراقب سوف يجد أن تلك الخصائص – التردد والطول الموجى والسرعة الموضعية (المحلية) – سوف يكون لها نفس القيم العددية نفسها.

• فى مجال جاذبية موازٍ، تتطابق المسافتان الإحداثية والحقيقية $dx = dx^A = dx^B$ كما هو واضح من المعادلة (٧,٢٠) أدناه [١٠٨]، ومن ثم يكون الطول الموجى للضوء عند *نقطة ما* واحدا لجميع المراقبين، أى أن $\lambda^A = \lambda^B = \lambda$

• السرعة الموضعية للضوء عند *نقطة ما* تكون مختلفة بالنسبة لمراقبين مختلفين (السرعة هى c فقط بالنسبة لمراقب عند تلك النقطة.)

اعتبر مرة ثانية إطارا لاقصوريا N^g ساكنا في مجال جاذبية موازٍ شدته g. إذا كان المحور z في الاتجاه الموازي المضاد للتسارع g فإن مقياس الزمكان في N^g يكون على الصورة [٥٦، ص ١٠٥٦]:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2gz}{c^2}\right) c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 . \qquad (7.20)$$

ومنها يمكن الحصول فورا على السرعة الإحداثية للضوء الذى ينتشر على طول المحور z (مما يعنى أن dx = dy = 0)، عند نقطة z في مجال جاذبية موازٍ (في حالة $ds^2 = 0$)، وتكون على الصورة (في نطاق حدود متناسبة مع c^{-2}):

$$c^g = \frac{dz}{dt} = c\left(1 + \frac{gz}{c^2}\right) . \qquad (7.21)$$

تخيل الآن تجربة أخرى في مجال جاذبية موازٍ داخل مصعد آينشتين الساكن على سطح الأرض (أى في N^g). يقام مراقبان ساكنان A و B على طول المحور x، بحيث يكون المراقب A على مسافة h فوق B. وبما أن A و B معلقان في مجال جاذبية، فإن خطيهما الكونيين يكونان مشوهين، وليسا

جيوديسيين، كما هو مبين في شكل ٧,٧. كل مراقب يرسل إشارات ضوئية نحو الآخر. الإشارتان الأوليان اللتان يرسلهما A و B تمثلان بخطيها الكونيين في شكل ٧,٧. الإشارتان اللتان يرسلهما B عند الحدثين M و N نحو الحدثين S و T على التوالى تمثلان بخطوط كونية مُقطّعة، بينما تمثل الإشاراتان الضوئيتان اللتان يرسلهما A عند الحدثين Q و R نحو الحدثين N و O على الترتيب بخطين كونيين متصلين. يبعث المراقبان بإشارات ضوئية كل نانو ثانية من زمنيها الحقيقيين، أى أن $d\tau^{A}_{QR} = d\tau^{B}_{MN} = 1\ \text{ns}$.

يمكن تحديد الزمنين الحقيقين لكل من A و B من المعادلة (٧,٢٠) باعتبار حقيقة أن $dx = dy = dz = 0$،

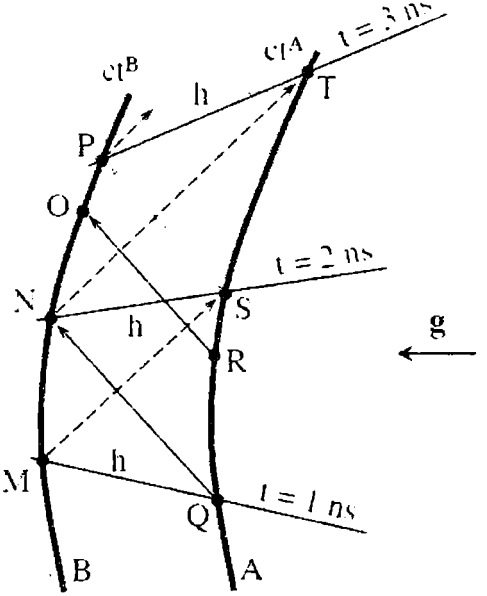
$$d\tau^{A} = \frac{ds^{A}}{c} = \left(1 + \frac{gz^{A}}{c^{2}}\right) dt \qquad (7.22)$$

و

$$d\tau^{B} = \frac{ds^{B}}{c} = \left(1 + \frac{gz^{B}}{c^{2}}\right) dt\ . \qquad (7.23)$$

نستطيع اختيار نقطة أصل النظام الإحداثى عند B، أى أن $z^{B} = 0$. عندئذ ينتج من (٧,٢٣) أن زمنيْ B الإحداثى والحقيقى يتطابقان: $d\tau^{B} = dt$. أيضا، كما يمكن أن يُرى من شكل ٧,٧، $d\tau^{B} = d\tau^{B}_{MN} = d\tau^{B}_{NP} = 1\ \text{ns}$. وبما أن $z^{A} = z^{B} + h = h$ ، فإنه ينتج من (٧,٢٢) و (٧,٢٣) أن نسبة $d\tau^{A}$ و $d\tau^{B}$ هى:

$$\frac{d\tau^{A}}{d\tau^{B}} = 1 + \frac{gh}{c^{2}}\ . \qquad (7.24)$$



شـــكل ٧,٧ المراقبان A و B معلقان في مجال جاذبية، ونتيجة لذلك تشوه خطاهما الكونيان، أى انحرفا عن شكلهما الجيوديسى. يصدر عن A و B إشارات ضوئية كل نانوثانية من زمنيهما الحقيقيين. نلاحـظ إشـارات B بواسطة A كأنها أزيحت نحو الأحمر، بينما تكون إشـارات A المقاسـة بواسطة B قد أزيحت نحو الأزرق.

دعنا نرى الآن كيف تُلاحظ الإشارات الضوئية المنبعثة من B بواسطة A. تنبعث الإشـارات الـضوئية، كمـا تُـرى عنـد B، بتـردد حقيقـى $f^B = (d\tau^B)^{-1}$ ، حيث $d\tau^B$ هى الفترة الزمنية الحقيقيـة التـى تـساوى 1 نانوثانية في حالتنا هذه. لكن فترة الضوء B، كما قيست من موضع A، هى $d\tau^A$ ، ومن ثم يكون ترددها:

$$f_1^B = (\mathrm{d}\tau^A)^{-1} \approx (\mathrm{d}\tau^B)^{-1}\left(1 - \frac{gh}{c^2}\right) = f^B\left(1 - \frac{gh}{c^2}\right) . \qquad (7.25)$$

وبهذا يكون التردد f_A^B المحدد بواسطة A أصغر من f^B، مما يعنى من وجهة نظر A أن الإشارات الضوئية قد انزاحت نحو الأحمر:

ولكى نفهم المعنى الفيزيائى للمعادلة (٧,٢٥)، والأكثر تحديدا معنى السؤال عما إذا كان تردد الإشارات الضوئية المنبعثة من B يتغير أثناء رحلتها إلى A، دعنا نناقش بتفصيل أكثر ما هو موضح بالرسم فى شكل ٧,٧. الانبعاث الآنى للإشارتين الأوليين من A عند الحدث Q ومن B عند الحدث M يحدد الفضاء اللحظى الذى يمثله خط التزامن t=1 ns للإطار اللاقصورى N^{o} الذى يكون فيه A و B فى حالة سكون. سرعة الضوء الإحداثية فى N^{o}، الذى يكون فيه A و B اللذان تفصلهما مسافة h، تكون واحدة فى كلا الاتجاهين A إلى B والعكس بالعكس. ونظرا لأن سرعة الضوء الإحداثية المتوسطة ذات قيم متساوية، فإن الإشارتين A و B تستغرقان الزمن الإحداثي نفسه (في مثالنا هذا يكون ١ نانوثانية) لكي تقطعا المسافة h. وبالتالي فإن الوصول المتزامن للإشارتين A وB عند الحدثين N و S، على الترتيب، يحدد الفضاء اللحظى للإطار N^{o} الذى يمثله خط التزامن t=2 ns الذى يشمل الحدثين الآنيين N و S.

انبعاث الإشارة الضوئية الثانية من B عند N يتطابق مع وصول الإشارة الأولى المنبعثة من A. لكن انبعاث الإشارة الضوئية الثانية من A لا يتطابق مع وصول الإشارة الضوئية الأولى المنبعثة من B لأنها تصل عند الحدث S، بينما يبعث A الإشارة الضوئية الثانية عند أول نانوثانية من زمنه الحقيقى، أى عند الحدث الأسبق R ($\tau_{QR}^{A} = 1\ \text{ns}$). حقيقة أن الإشارة B تستغرق أكثر من نانوثانية واحدة من الزمن الحقيقى الذى يقطع فيه A المسافة h توضح أن السرعة الحقيقية المتوسطة للإشارات الضوئية المتحركة

بين A و B تكون أصغر من سرعتها الحقيقية المتوسطة التى يحددها B لأن الإشارات الضوئية تستغرق نانوثانية واحدة من زمن B الحقيقى لكى تقطع المسافة h فى أى اتجاه.

ولتعريف خط التزامن t=3 ns، يرسل A إشاره إضافية نحو B عند S (عندما تصل إشارة B الأولى) يمثلها الخط الكونى الرمادى. إشارة A المرسلة عند S وإشارة B المرسلة عند N تصلان آنيا عند الحدثين P و T على التوالى، الذين يقعان على خط التزامن t=3 ns. لاحظ أن الإشارة الضوئية الثانية المنبعثة من A عند R تصل إلى B عند الحدث O، مما يعنى أن إشارات A يلاحظها B فى صورة انزياح نحو الأزرق، لأن $d\tau_{NO}^{B} < 1\ \text{ns}$.

نحن الآن فى وضع يتطلب الإجابة عن السؤال عما إذا كان تردد إشارات B يتغير أثناء رحلتها إلى A. ترددها الحقيقي كما يحدده B عند موضع B هو $f^{B} = (d\tau_{MN}^{B})^{-1} = (d\tau^{B})^{-1}$. لكن بأخذ المعادلة (٧,٢٤) فى الاعتبار، فإن A يظن أن التردد الابتدائى لإشارات B عند B (كما تقاس عند موضع A)، فى نطاق الحدود المتناسبة مع c^{-2} ، هو:

$$f_{A}^{B}(\text{initial}) = (\mathrm{d}\tau_{QS}^{A})^{-1} \approx (\mathrm{d}\tau_{MN}^{B})^{-1}\left(1 - \frac{gh}{c^{2}}\right) = f^{B}\left(1 - \frac{gh}{c^{2}}\right) . \quad (7.26)$$

لأن حدثيْ انبعاث إشارتى B الأوليين – M و N – متزامنان مع الحدثين Q و S على الترتيب، ويكون زمن A الحقيقى بين Q و S هو $d\tau_{QS}^{A} > d\tau_{MN}^{B}$

يحدد المراقب A مباشرة التردد النهائى للضوء المنبعث بواسطة B بقياس الزمن الحقيقي بين الحدثين S و T لوصول إشارات B، ويجد، بأخذ المعادلة (٧,٢٤) فى الاعتبار، أن

$$f_A^B(\text{final}) = (\mathrm{d}\tau_{ST}^A)^{-1} \approx (\mathrm{d}\tau_{NP}^B)^{-1}\left(1-\frac{gh}{c^2}\right) = f^B\left(1-\frac{gh}{c^2}\right) \qquad (7.27$$

من وجهة نظر A، يتضح من المعادلتين (٧,٢٥) و(٧,٢٦) أن الضوء القادم من B انبعث *بتردد مخفض ابتداءً* ولم يتغير(*) أثناء انتشار الإشارات الضوئية من B إلى A، لأن التردد النهائى (٧,٢٧) لإشارات B المقاسة بواسطة A يساوى ترددها الابتدائى عند B كما حدده A.

يمكن الحصول على المعادلة نفسها لتردد إشارات B الابتدائى عند B كما يحدده A إذا أفدنا من حقيقة أنه، فى مجال ثقالي موازٍ، تتطابق المسافة الحقيقية والإحداثية. هذا يعنى أن الطول الموجى الابتدائى λ^A لإشارات B عند B كما حسبه A يساوى الطول الموجى الابتدائى λ^B كما قيس عند B، أى أن $\lambda^A = \lambda^B = \lambda$. بحساب السرعة الابتدائية لإشارات B عند B كما قيست من موضع A تكون

$$c_A^B = \frac{\mathrm{d}z^B}{\mathrm{d}\tau^A} = \frac{\mathrm{d}z^B}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau^A}\,.$$

حيث $\mathrm{d}z^B/\mathrm{d}t$ هى السرعة الإحداثية عند نقطة B،

$$c^B = c\left(1+\frac{gz^B}{c^2}\right) = c\,.$$

و

لأن $z^B = 0$. من(٧,٢٢) ينتج أن

$$\mathrm{d}t = \left(1-\frac{gz^A}{c^2}\right)\mathrm{d}\tau^A\,.$$

(*) بالطريقة نفسها يمكن إيضاح أن إشارات A، كما يقيسها B، تنبعث بتردد زائد فى البداية، ويكون مساويا لترددها النهائى عندما تصل إشارات A إلى B.

وبما أن $z^A = z^B + h = h$ ، نحصل على

$$c_A^B = c\left(1 - \frac{gh}{c^2}\right) . \qquad (7.28)$$

عندئذ يكون تردد إشارات B عند B كما قيس من موضع A هو

$$f_A^B = \frac{c_A^B}{\lambda} = f^B\left(1 - \frac{gh}{c^2}\right) .$$

حيث $f^B = c/\lambda$ هو التردد الحقيقى المقاس بواسطة B عند موضع B.

الحقيقة التى تقضى بأن تردد الضوء القادم من B لا يتغير توضح أن طاقة الضوء ثابتة – فى إشارة إلى أن الضوء لا يفقد طاقة أثناء حركته ضد المجال الثقالي الإستاتيكى الموازي المأخوذ فى الاعتبار هنا. على العكس من ذلك، إذا لوحظ الضوء المنبعث من A عند B فإن طاقته الثابتة تشير إلى أنه لا يكتسب طاقة، ومن ثم فإنه لا يسقط فى المجال الثقالي الاستاتيكى. (وإذا ما سقط فإن مقدار سرعته المتوسطة إلى أسفل سيكون أكبر من مقدار سرعته المتوسطة إلى أعلى، وهو مالم يحدث كما رأينا).

السرعة الابتدائية لإشارات B عند B، كما قاسها A، تُعطَى بالمعادلة (٧,٢٨)؛ واضح أن سرعتها النهائية عند A، كما قيست عند A، يجب أن تكون c. التغير فى سرعة الضوء على مساره نحو A يفسر أيضا الآلية المسئولة عن التغير فى طوله الموجى. وكما يتضح من A، أى جبهة موجية متحركة بعيدًا عن B نحو A تكتسب سرعة أكبر مقارنةً بسرعة الجبهة الموجية التى تليها. وبسبب تزايد مقدار سرعة الجبهة الموجية الأولى تزداد المسافة الفاصلة بين الجبهتين الموجبتين لفترة زمنية واحدة $d\tau^A$ يقطع الضوء خلالها المسافة h من B إلى A (كما قاسها A) بمقدار

$$\Delta\lambda = \int_0^h \delta\lambda \ .$$

حيث

$$\delta\lambda = \delta c \, \mathrm{d}\tau^A \ .$$

هنا يكون

$$\delta c = c\left[1 + \frac{g(z+\mathrm{d}z)}{c^2}\right] - c\left(1 + \frac{gz}{c^2}\right) = c\frac{g\mathrm{d}z}{c^2}$$

هو التغير فى السرعة الإحداثية عبر المسافة dz. عندئذ تكون الزيـــادة فى الطول الموجى التى تتجمع عبر المسافة h من B إلى A هى

$$\Delta\lambda = \int_0^h \delta\lambda = \int_0^h \delta c \mathrm{d}\tau^A = c\frac{g\mathrm{d}\tau^A}{c^2}\int_0^h \mathrm{d}z = c\frac{gh}{c^2}\mathrm{d}\tau^A \ .$$

وبما أن لدينا من المعادلة (٧,٢٤):

$$\mathrm{d}\tau^A = \mathrm{d}\tau^B\left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \ .$$

إذن يمكننا استنتاج $\Delta\lambda$، مع الإبقاء فقط على الحدود المتناسبة مع c^{-2}، لتكون:

$$\Delta\lambda = c\frac{gh}{c^2}\mathrm{d}\tau^B = \lambda\frac{gh}{c^2} \ .$$

حيث $c\mathrm{d}\tau^B = \lambda$ هو الطول الموجى الابتدائى كمـــا يقـــاس عنـــد B. الطول الموجى النهائى (المقاس) لإشارات B عند A يكون عندئذ،

$$\lambda^A = \lambda + \Delta\lambda = \lambda\left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \ . \qquad (7.29)$$

وبناء على ذلك، فى الانزياح الأحمر الثقالي، تكون سرعة الضوء وطوله الموجى هما اللذان يتغيران، بينما يظل تردده ثابتا.

لكى تكون لدينا مناقشة مكتملة للانزياح الأحمر الثقالي يجب أن نرى ماذا يحدث لتردد إشارات B وسرعتها وطولها الموجى أثناء انتشارها ووصولها إلى موضع A كما تُقاس بواسطة B. بحسب A، ينبعث الضوء من B بتردد مخفَّض فى البداية، لكنه يظل ثابتا. وفى الحقيقة، عندما تستقبل إشارات الضوء عند A، يكون ترددها النهائى مساويا لترددها الابتدائى. لكن A يجد أن سرعة ضوء B وطوله الموجى يتغيران. بالنسبة للمراقب A، سوف تتسارع إشارات B من B إلى A من السرعة الابتدائية المعطاة بالمعادلة (٧,٢٨) عند B كما يقيسها A إلى السرعة النهائية c عند موضع A كما يقيسها A. وكما رأينا، هذه الزيادة فى سرعة ضوء B تسبب الطول الموجى النهائى الأكبر (المعادلة ٧,٢٩) مقاسا بواسطة A عند موضع A.

لكن إذا كان A يقيس طولاً موجيا نهائيا أكبر، فإن B يجب أن يقيس نفس الطول الموجى النهائى لإشارات ضوء B عندما تصل إلى A، حيث تكون المسافات الفضائية واحدة لجميع المراقبين، فى مجال ثقالي موازٍ (وفى إطار إسناد متسارع). يتضح فى النهاية أن هذه هى حالة B تماما. تنبعث إشارات B بتردد حقيقى $f^B = (\mathrm{d}\tau^B)^{-1}$ عند B، ويحدد B أن الإشارات تصل إلى A التردد نفسه، لأن الحدثين S و T على خط A الكونى متزامنان مع الحدثين N و P على خط B الكونى، على الترتيب، مما يعنى أن الفترة الزمنية للإشارة B عند وصولها إلى A هى $\mathrm{d}\tau^B_{NP} = \mathrm{d}\tau^B = 1\ \mathrm{ns}$. وبهذا فإن تردد الإشارات الضوئية المنبعثة من B لا يتغير من وجهة نظر B أيضا.

وبالنسبة للمراقب B سوف تتغير سرعة الضوء من c إلى $c(1+gh/c^2)$ عند A كما يحددها B. على نحو ما أوضحنا في قسم ٧,٤. هذه الزيادة في سرعة الضوء كلما ابتعد عن B في اتجاه A تسبب الزيادة في الطول الموجي النهائي لإشارات B عندما تصل عند A كما يحددها B. نفس الآلية الموضحة بالوصف أعلاه تسمح للمراقب B بحساب الطول الموجي النهائي لإشارات B عند A، وتتطابق معادلته مع المعادلة (٧,٢٩).

٧,٨ تأثير ساجناك

يمكن وصف تأثير ساجناك على النحو التالي. عندما تنبعث إشارتان ضوئيتان من نقطة M على حافة قرص دوّار وتنتشران على طول حافته في اتجاهين متعاكسين، فإنهما لا تصلان عند M في آن معًا. لا يزال هناك من يشككون في النسبية الخاصة وهذه الظاهرة هي حجتهم الأساسية. يزعم هؤلاء أنه بالنسبة لمراقب على القرص الدوار لا يكون مقدار سرعة الضوء ثابتًا – وأن قانون إضافة السرعات لجاليليو ($c+v$ و $c-v$، حيث v مقدار السرعة المدارية عند نقطة على حافة القرص) يجب أن يستخدمه المراقب الدوار لكي يفسر الفرق الزمني في وصول الإشارتين الضوئيتين عند M. وبهذا، طبقًا لمخالفي النسبية، يستطيع المرء أن يكتشف الحركة المطلقة لنقطة على حافة القرص.

إن ما يبعث على المزيد من التشبث بمثل هذه المزاعم هو عدم وجود رؤية أو نظرية واضحة فيما يتعلق بموضوع مقدار سرعة الضوء في أُطر إسناد لاقصورية، وما تنص عليه النسبية الخاصة هو أن مقدار سرعة الضوء ثابت فقط في أُطر الإسناد القصورية – وهذا الثبات ناتج عن استحالة اكتشاف

حركة منتظمة مطلقة. (بدقة أكثر، ينتج عن عدم وجود حركة منتظمة مطلقة.) الحركة المتسارعة يمكن اكتشافها، ولهذا السبب تكون سرعة الضوء الإحداثية في أُطر إسناد لاقصورية دالة في التسارع الحقيقي للإطار. القرص الدوار عبارة عن إطار إسناد لاقصوري، وتسارعه يمكن اكتشافه بوسائل مختلفة تشمل إشارات ضوئية. هذا هو السبب في عدم الدهشة من القول بأن سرعة الضوء الإحداثية المقاسة على القرص تعتمد على العجلة (التسارع) الجاذبة المركزية للقرص. وكما سنرى أدناه، السرعة الضوئية الإحداثية المحسوبة على القرص *ليست* تأييدًا لقانون إضافة السرعة لجاليليو.

اعتبر قرصين مركزاهما متطابقان، أحدهما ثابت (ساكن) والآخر يدور بسرعة زاوية ثابتة ω. وبما أن القرص الساكن يمكن اعتباره كإطار قصوري، فإن مقياسه يكون هو مقياس مينكوفسكي:

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 . \qquad (7.30)$$

ولكتابة الفترة ds^2 بإحداثيات قطبية، نستخدم التحويل

$$t = t . \quad x = R\cos\Phi . \quad y = R\sin\Phi . \quad z = z . \qquad (7.31)$$

بتعويض (٧,٣٠) في (٧,٣١) نحصل على

$$ds^2 = c^2dt^2 - dR^2 - R^2d\Phi^2 - dz^2 \qquad (7.32)$$

افترض مراقبًا على القرص الدوار يستخدم الإحداثيات t، r، φ، و z. واضح أن التحويل بين الإحداثيات على القرص الساكن والدوار يكون:

$$t = t . \quad R = r . \quad \Phi = \varphi + \omega t . \quad z = z . \qquad (7.33)$$

الزمن لا يتغير فى هذا التحويل لأن الزمن الإحدائى علـى القـرص الدوار يُعطَى بواسطة الساعة الموجودة عند مركزه، وهذه الـساعة سـاكنة بالنسبة للقرص الساكن القصورى [٥٥]. بتعـويض (٧,٣٣) فـى (٧,٣٢) نحصل على المقياس metric على القرص الدوار:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}\right) c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 d\varphi^2 - 2\omega r^2 dt d\varphi - dz^2 . \qquad (7.34)$$

وبما أن الضوء ينتشر على طول جيوديسيات صفرية ($ds^2=0$)، فإنـه يمكننا حساب سرعة الضوء الإحدائية المماسية $c^{\varphi} \equiv r(d\varphi/dt)$ من المعادلة (٧,٣٤) باعتبار حقيقة أن $dr=0$ و $dz=0$ لضوء منتشر على سـطح قـرص دوار على طول حافته (نصف قطرها r). يجب ألا أن نعين $d\varphi/dt$. لـدينا من المعادلة (٧,٣٤)

$$r^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + 2\omega r^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right) - \left(1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}\right) c^2 = 0 .$$

حل هذه المعادلة التربيعية يعطى قيمتين لـ $d\varphi/dt$، إحداهما فى اتجـاه تزايد φ ($+\varphi$) (فى اتجاه دوران القرص) والأخرى فى عكس الاتجاه ($-\varphi$):

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^{-\varphi} = -\omega + \frac{c}{r} . \qquad \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^{-\varphi} = -\omega - \frac{c}{r} .$$

عندئذ يكون لدينا بالنسبة للسرعتين الإحداثيتين المماستين $c^{+\phi}$ و $c^{-\phi}$:

$$c^{-\varphi} \equiv r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^{-\varphi} = c\left(1 - \frac{\omega r}{c}\right) \qquad (7.35)$$

و

$$c^{-\varphi} \equiv r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^{-\varphi} = -c\left(1 + \frac{\omega r}{c}\right) . \qquad (7.36)$$

وكما هو موضح من المعادلتين (٧,٣٥) و(٧,٣٦)، السرعتان الإحداثيتان المماستان *ثابتتان* بالنسبة لقيمة معينة r، مما يعنى أن (٧,٣٥) و(٧,٣٦) تمثلان أيضا السرعتين الإحداثيتين المتوسطتين للضوء. مقدار السرعة الإحداثية للضوء المنتشر فى اتجاه دوران القرص يكون أصغر من مقدار السرعة الإحداثية فى الاتجاه المعاكس.

هذه الحقيقة تسمح لمراقب على قرص دوار أن يفسر السبب فى أن إشارتين ضوئيتين منبعثتين من نقطة ما M على حافة قرص، وتنتشران على طول الحافة فى اتجاهين معاكسين، لن تصلا آنيا فى اللحظة نفسها عند M – بما أن مقدار السرعة الإحداثية للإشارة الضوئية المنتشرة فى عكس اتجاه دوران القرص أكبر من مقدار سرعة الإشارة الأخرى، فإنها سوف تصل أولا عند M.

الزمن الذى تستغرقه الإشارة الضوئية فى الانتقال على طول الحافة فى اتجاه دوران القرص لإتمام دورة كاملة يساوى:

$$\Delta t^{-\varphi} = \frac{2\pi r}{c^{-\varphi}} = \frac{2\pi r}{c(1-\omega r/c)} = \frac{2\pi r}{c-\omega r}.$$

الزمن اللازم لإتمام دورة واحدة تنتشرها إشارة ضوئية فى عكس الاتجاه هو:

$$\Delta t^{-\varphi} = \frac{2\pi r}{|c^{-\varphi}|} = \frac{2\pi r}{c(1+\omega r/c)} = \frac{2\pi r}{c+\omega r}.$$

وصول الإشارتين الضوئيتين عند M تفصله الفترة الزمنية

$$\delta t = \Delta t^{-\varphi} - \Delta t^{-\varphi} = \frac{4\pi\omega r^2}{c^2-\omega^2 r^2}. \qquad (7.37)$$

الفارق الزمنى (٧,٣٧) ينشأ بسبب اختلاف مقدارى السرعتين الإحداثيتين للضوء فى الاتجاهين $+\varphi$ و $-\varphi$. يجب التأكيد هنا على أن $c^{+\phi}$ و $c^{-\phi}$ مختلفتان عن c بسبب الحركة (الدوران) المتسارعة للقرص. وبدلالة السرعة المدارية $v=\omega r$، يبدو أن السرعتين الإحداثيتين المماستين يمكن كتابتهما كدالة فى v على الصورة:

$$c^{-\varphi}=c\left(1-\frac{v}{c}\right)=c-v. \qquad c^{-\varphi}=c\left(1+\frac{v}{c}\right)=c+v.$$

التى تشبه قانون جاليليو لإضافة السرعة. من ناحية أخرى، يتضح تماما أن هذا التشابه مضلّل – بسبب العجلة الجاذبة المركزية (العمودية) $a^N=v^2/r$، يتغير *اتجاه* السرعة المدارية بثبات أثناء دوران القرص، مما يعنى أن $c^{+\phi}$ و $c^{-\phi}$ تعتمدان على التسارع العمودي للقرص:

$$c^{-\varphi}=c\left(1-\frac{\sqrt{a^N r}}{c}\right) \tag{7.38}$$

و

$$c^{-\varphi}=c\left(1+\frac{\sqrt{a^N r}}{c}\right). \tag{7.39}$$

وكما هو متوقع، المعادلتان (٧,٣٨) و (٧,٣٩) مماثلتان للسرعتين الإحداثيتين المتوسطتين (٧,٥) و (٧,٦) (للحالة $z_B=0$)، بمعنى أن جميع السرعات الإحداثية تعتمد على التسارع (العجلة) وليس السرعة.

٧,٩ ملخص

عرّج هذا الفصل مرة ثانية على السؤال الخاص بثبات مقدار سرعة الضوء، وذلك بتوضيح أن له إجابتين – مقدار سرعة الضوء ثابت فى جميع أُطر الإسناد القصورية، لكن عندما يقاس فى إطار لاقصورى فإنه يعتمد على التسارع الحقيقى للإطار. (إلا أن سرعة الضوء الموضعية تكون دائما c). لقد تم توضيح أن الوصف الكامل لانتشار الضوء فى أُطر إسناد لاقصورية يتطلب سرعة ضوئية إحداثية متوسطة وحقيقية متوسطة. الحاجة إلى سرعة إحداثية متوسطة تم توضيحها فى حالة تجربة مصعد آينشتين الفكرية – لتفسير حقيقة أن الإشارتين الضوئيتين المنبعثتين من نقطتين A و C فى شكل ٧,١ تلتقيان عند B' وليس عند B. تم كذلك توضيح أن تأثير شابيرو للتأخر الزمنى تستخدم فيه ضمْنًا سرعة حقيقية متوسطة للضوء؛ عندما تُعرَّف مثل هذه السرعة صراحة، ينتج فى حالة مجال ثقالي موازٍ ألا يكون تأثير شابيرو دائما تأخرًا زمنيًا.

كذلك تمت زيارة تأثير ساجناك مرة ثانية بتعريف سرعة الضوء الإحداثية فى إطار لاقصوري للقرص الدوار. هذه السرعة تشرح طبيعيًا حقيقة أن إشارتين ضوئيتين من نقطة ما على حافة القرص الدوار ومنتشرتين على طول حافته فى اتجاهين متعاكسين لا تصلان آنيا عند النقطة نفسها.

الفصل الثامن

حساب المجال الكهربي لشحنة في إطار إسناد لاقصوري

الطريقة العادية لحساب المجال الكهربي لشحنة ساكنة في إطار إسناد لاقصوري N (متسارع N^a أو معلق في مجال ثقالي N^g)، هي أن تحول المجال من إطار إسناد قصوري I إلى N (انظر على سبيل المثال [١١٨])، يكمن السبب في أن الحساب *المباشر* للجهد والمجال الكهربي لشحنة في N ينتهي إلى مشكلة عصيّة الحل. لكن الحساب المباشر لهاتين الكميتين في N^a وN^g ضروري للتطبيق الصارم لمبدأ التكافؤ، مما يتطلب مقارنة معادلتي الكميتين الفيزيائيتين في N^a وN^g.(*)

٨,١ حساب جهد شحنة كهربية في إطار إسناد لاقصوري

في عام ١٩٢١م درس فيرمي [١١٢] طبيعة القوة المؤثرة على شحنة ساكنة في مجال ثقالي شدته g في نطاق النسبية العامة ونظرية الإلكترون الكلاسيكية، واستنتج الجهد:

(*) يمكن الحصول على هاتين المعادلتين في مجال قصوري متحرك بالتلازم (لحالة Na) وفي مجال الإسناد القصوري الموضعي (لحالة Ng)، ثم تعقد المقارنة. من ناحية أخرى، كما سنرى لاحقا، تطبيق (أو تحقيق) مبدأ التكافؤ لا يوفر أي فهم فيزيائي عميق لما يقع وراء تكافؤ الظواهر الملاحَظة في Na وNg. فضلا عن ذلك، إذا كانت جميع الظواهر متساوية في Na وNg، فلماذا عندئذ يصعب وصف تأثيراتها وحسابها مباشرة في أُطر الإسناد اللاقصورية ذاتها.

$$\varphi_{\mathrm{F}}^{\mathrm{g}} = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{gz}{c^2}\right) . \qquad (8.1)$$

حيث $g=|\mathbf{g}|$ في مجال إسناد قصوري N^{g} تكون فيه الشحنة e ساكنة لكن هذه المعادلة تحتوي على معامل 1/2 داخل القوسين، وهو ما يؤدي إلى تناقض مع مبدأ التكافؤ. لكي نفهم هذا دعنا نحسب المجال الكهربي من هذا الجهد [١١٢]:

$$\mathbf{E}_{\mathrm{F}}^{\mathrm{g}} = -\nabla\varphi_{\mathrm{F}}^{\mathrm{g}} = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{n}}{2c^2 r}\mathbf{n} + \frac{\mathbf{g}}{2c^2 r}\right) . \qquad (8.2)$$

حيث $\mathbf{r}$ هو متجه الإزاحة من النقطة التي توجد عندها الشحنة إلى النقطة التي يحسب عندها $\mathbf{E}_{\mathrm{F}}^{\mathrm{g}}$. يتطلب مبدأ التكافؤ أن يكون المجال الكهربي لشحنة في N^{g} هو نفس ذلك المجال الكهربي لشحنة ساكنة في مجال إسناد متسارع N^{a} عجلته هي $\mathbf{a}=-\mathbf{g}$. بمعنى آخر، بتعويض $\mathbf{g}=-\mathbf{a}$ في (٨,٢) ينبغي أن يعطي المجال الكهربي $\mathbf{E}^{\mathrm{a}}$ للشحنة في N^{a}. سوف نحسب لاحقا $\mathbf{E}^{\mathrm{a}}$ مباشرة في N^{a}، لكن دعنا لبرهة نقارن المجال الكهربي (٨,٢) بالمجال الكهربي لشحنة e مقاسة في إطار إسناد قصوري I تكون فيه الشحنة المتسارعة في حالة سكون لحظيا (انظر [١١٧، ص ٦٦٤] لحالة المجال اللحظي، أي عندما تكون سرعته بالنسبة إلى I تساوي صفرًا).

$$\mathbf{E}^{\mathrm{a}} = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} + \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} - \frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right) . \qquad (8.3)$$

يمكننا فعل هذا لأن المجال الكهربي اللحظي لشحنة في I يعتمد فقط على تسارع الشحنة، وليس على سرعتها بالنسبة إلى I. وبما أن التسارع مطلق، فإن تأثيره على شكل المجال الكهربي يكون مطلقًا أيضا، مما يعني أن شكل المجال يجب أن يكون واحدًا بالنسبة لجميع المراقبين (القصوريين وغير القصوريين).

توضح المقارنة بين (٨,٢) و(٨,٣) أن المجال الكهربي لشحنة معلقة في مجال الجاذبية الأرضية يتطابق مع المجال الكهربي اللحظي لشحنة متحركة بتسارع $\mathbf{a} = -\mathbf{g}/2$. وبما أن مبدأ التكافؤ يتطلب أن تكون $\mathbf{a} = -\mathbf{g}$، فواضح أن المعامل ½ في الحدود المشتملة على (٨,٢) يشير إلى أن شيئا ما لم يتم اعتباره في حسابات الجهد والمجال الكهربي لشحنة في إطار إسناد لاقصوري.

رأينا في الفصل الأخير أن انتشار الضوء في أُطر إسناد لاقصورية يكون غير متماثل اتجاهيا، بسبب مطلقية التسارع (العجلة)، مما يتيح لمراقب لاقصوري أن يكتشف تسارعه. هذا الحقيقة ذات تضمين مباشر لأي حسابات كهرمغناطيسية في إطار إسناد لاقصوري N، حيث إن انتشار أي اضطراب في مجال شحنة ما في N يكون أيضا غير متماثل اتجاهيًا. لكي نفهم هذا دعنا نكتب جهد الشحنة الساكنة في N^g على الصورة.

$$\varphi^g = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho V^g}{r^g}\,. \qquad (8.4)$$

حيث ρ كثافة الشحنة، V^g حجم الشحنة، ومتجه نصف القطر r^g هو المسافة من الشحنة إلى نقطة المراقبة (حيث يقاس الجهد) كل منها مُقاس في N^g.

هناك ثلاث كميات يمكنها أن تتأثر بالانتشار غير المتماثل للضوء (وأي اضطرابات كهرمغناطيسية في معادلة الجهد (٨,٤) هذه الكميات هي الشحنة، والمسافة r^g والحجم V^g.

يخبرنا الدليل التجريبي أن الشحنة هي ثابت (لامتغير) لورنتز (انظر[١١٧، ص ٥٥٤] والمراجع الموجودة فيه). هذه الحقيقة مع حقيقة أخرى – تقضي بأن جميع الكميات الفيزيائية المقاسة في أي لحظة في مجال إسناد لاقصوري N^a أو N^g مساوية لتلك التي تقاس في إطار إسناد متحرك بالتلازم أو قصوري موضعي I – توضحان أن الشحنة e^g المقاسة في الإطار

N^g (المعلق في مجال جاذبية الأرض) تساوي الشحنة e المقاسة في المجال القصوري الموضعي I. سوف نعود إلى هذه النقطة بعد قليل.

يتأثر متجه نصف القطر r^g بالانتشار اللامتماثل للضوء في N^g للسبب التالي. افترض أن الشحنة تغير موضعها فجأة. في لحظة معينة من الزمن الإحداثي t في N^g، سوف يصل الاضطراب في مجال الشحنة إلى نقاط حول الشحنة، تقاس بمتجه نصف القطر r^g، والتي لا تقع على كرة يكون مركزها عند النقطة التي تتموضع فيها الشحنة؛ تلك النقاط سوف تشكل أيضا كرة. ويكون الأمر كذلك لأن سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة تختلف باختلاف الاتجاهات. بالتعبير عن r^g بالعلاقة $r^g = \bar{c}^g t$، وباعتبار حقيقة أن $\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}/2c^2 < 1$، يمكننا (مع الإبقاء فقط على الحدود المتناسبة مع c^{-2}) كتابة:

$$(r^g)^{-1} \approx r^{-1}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right). \qquad (8.5)$$

في حقيقة الأمر، تمثيل r^g على الصورة $r^g = \bar{c}^g t$ لا يتم خصيصا للحسابات في N^g. متجه نصف القطر r يكتب أيضا على الصورة r=ct [١١٣، ص ٤١٦]. في حسابات جهود لينارد – فايتشيرت Lienard-Wiechert في إطار إسناد قصوري.

إن التعويض عن $(r^g)^{-1}$ في (٨,٤) يعطي الجهد (٨,١) كما حصل عليه فيرمي. وهذه إشارة إلى أن الحجم V^g لشحنة في N^g سوف يتأثر أيضًا بالانتشار اللامتماثل للضوء هنا. وفي واقع الأمر، كما سنرى الآن، تؤدي سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة اللامتماثلة اتجاهيًا (١٤,٧) إلى ظهور حجم V^g (غير متطابق مع الحجم الفعلي V) مشابه لحجم لينارد – فايتشيرت (أو بالأحرى لامتماثل اتجاهيًا) ويزيل المعامل 1/2 من المعادلة (٨,١) ومن ثم من (٨,٢) أيضا.

إن أصل V^g هو مناظر لأصل حجم لينارد – فايتشيرت V^{LW} = V/(1- v.**n**/c) لشحنة متحركة بسرعة v بالنسبة إلى مراقب قصوري I، حيث **n** = **r**/*r* و**r** هو متجه نصف القطر عند الزمن المتأخر [١١٣، ص ٤١٨] وتعتمد إحدى طرق تفسير V^{LW} على "كرة تجميع المعلومات" المنسوبة إلى بانوفسكي وفيليبس [١١٤] المستخدمة في استنتاج جهود لينارد– فايتشيرت؛ تستخدم مفاهيم مماثلة بواسطة جريفت [١١٣، ص ٤١٨]. فينمان [١١٥، ص 10-21] وشوارتز [116].

الشحنة المقتربة من نقطة الملاحظة التي تقاس فيها تسهم أثر في الجهد هناك لأنها "تمكث مدة أطول داخل كرة تجميع المعلومات" [١١٤، ص ٣٤٣]، التي تتحرك بسرعة الضوء c في I أثناء اقترابها نحو نقطة الملاحظة. الإسهام الأعظم في الجهد يمكن اعتباره بادئا من شحنة حجم لينارد – فايتشيرت V^{LW} التي تظهر أعظم(*) من V. إذا كانت الشحنة تتراجع عن نقطة الملاحظة، فإن كرة تجميع المعلومات تتحرك في مقابل الشحنة، وتمكث الشحنة زمنا أقل داخل الكرة، ويمكن اعتبار الإسهام الناتج الأقل في الجهد صادرًا من شحنة ذات حجم لينارد فايتشيرت V^{LW} أصغر ظاهريا من V.

بالمنطق نفسه يبدو الحجم اللامتماثل اتجاهيا V^g مختلفا أيضًا عن V في N^g. اعتبر شحنة طولها *l* ساكنة في N^g على طول اتجاه **g**. الزمن الذي تستغرقه كرة تجميع المعلومات بسرعة الضوء المتوسطة (٧,١٤) في N^g يمتد لتشمل الشحنة هو:

(*) حقيقة أن حجم الشحنة يعتمد على نقطة الملاحظة التي يقاس عندها الجهد لا تعني أن هناك انتهاكا لثبات الشحنة الكهربية. لمزيد من المناقشة النوعية لهذه النقطة انظر[١١٤، ص ٣٤٢]: ولاستنتاج حجم لينارد – فايتشيرت في حساب جهود لينارد – فايتشيرت انظر [١١٤، ص ٤١٩].

$$\Delta t^{g} = \frac{l}{\bar{c}^{g}} = \frac{l}{c\,(1+\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}/2c^{2})} \approx \Delta t^{l}\left(1-\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^{2}}\right) .$$

حيث $\Delta t^{l} = l/c$ هو الزمن الذي تستغرقه كرة تجميع المعلومات في الانتشار بسرعة c لتشمل شحنة قصورية لها الطول نفسه l في إطارها الساكن. إذا كانت نقطة المراقبة التي يحسب عندها الجهد فوق الشحنة، فإن كرة تجميع المعلومات تتحرك ضد g في N^{g}. وتكون سرعتها المتوسطة أصغر من c (كما قيست عند تلك النقطة)، ومن ثم يكون $\Delta t^{g} > \Delta t^{l}$ (حيث $\mathbf{g}.\mathbf{r} = -gr$). والنتيجة أن الشحنة تمكث فترة أطول داخل الكرة ويكون إسهامها في الجهد أكبر. هذا يكافئ القول بأن الإسهام الأكبر مصدره شحنة ذات طول أكبر l^{g} يعطي للزمن نفسه Δt^{g} الذي تستغرقه كرة تجميع معلومات منتشرة بسرعة c، بالمعادلة

$$l^{g} = \Delta t^{g} c = l\left(1-\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^{2}}\right) .$$

إذا كانت النقطة التي يقاس عندها الجهد تقع أسفل الشحنة، فإن طول الشحنة سوف يبدو أقصر لأن كرة تجميع المعلومات تنتشر في اتجاه g. هذا يعني أن $\mathbf{g}.\mathbf{r} = gr$ ومن ثم يكون إسهام الشحنة في الجهد عند تلك النقطة أقل.

يتضح أن الحجم المناظر لمثل هذا الطول الظاهري l^{g} هو

$$V^{g} = V\left(1-\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^{2}}\right) . \qquad (8.6)$$

بتعويض (٨,٥) و(٨,٦) في (٨,٤) يكون الجهد القياسي للشحنة V^{g}هو

$$\varphi^{g} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_{0}}\frac{\rho V^{g}}{r^{g}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_{0}}\frac{\rho V}{r}\left(1-\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^{2}}\right)^{2} ,$$

أو، إذا أبقينا فقط على الحدود المتناسبة مع c^{-2}

$$\varphi^g = \frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right). \qquad (8.7)$$

كما هو واضح من المعادلة (٨,٧)، استخدام V^g بدلا من V يبرر وجود المعامل ½ في المعادلة (٨,١). وهذا يشير إلى استحالة طرح وصف متكامل للظواهر الكهرمغناطيسية في N^g بدون استخدام السرعة الحقيقة المتوسطة للضوء (٧,١٤) والحجم الناتج اللامتماثل اتجاهيًا (٨,٦).

وحيث إن تأثير الانتشار اللامتماثل اتجاهيا للضوء على عنصر الحجم في إطار إسناد لاقصوري لم يلاحظ حتى الآن، دعنا ندرسه بتفصيل أكثر. هناك سبب آخر لجذب اهتمام خاص بهذا التأثير. التحليل الدقيق للأصل الفيزيائي لجهد لينارد – فايتشيرت (على غرار التحليل الذي أجرى في [١١٣، ص ٤١٨]، [١١٥، ص 10-21]، و[١١٦]) يؤدي إلى السؤال الأساسي: كيف تستطيع الشحنة تحديث مجالها (وجهدها)؟ وما إن يُفهم هذا السؤال، لا يكون هناك ما يدعو إلى الدهشة في ظهور عنصر الحجم اللامتماثل في أُطر الإسناد اللاقصورية.

٨,٢ أصل فيزيائي مشترك لجهود لينارد– فايتشيرت وجهود الشحنة في إطار إسناد لاقصوري.

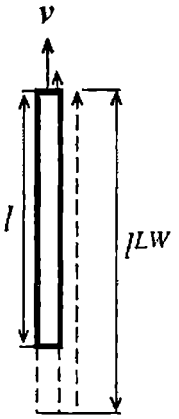
لفهم السبب في أن الانتشار اللامتماثل اتجاهيًا للضوء في مجال إسناد لاقصوري N يؤدي إلى مثل إسهام لينارد– فايشيرت في جهد شحنه مُقاس في N، دعنا نعتبر أولاً بمزيد من التفصيل أصل جهود لينارد– فايتشيرت ذاتها. فهي، كما رأينا في القسم الأخير، تنشأ من شحنة ظاهرية في حجم الشحنة المقاسة عند نقطة الملاحظة [١١٣، ١١٥].

وللتحقق على نحو أفضل من الأصل الفيزيائي لهذه الشحنة الظاهرية في الحجم، اعتبر شحنة $e=\rho V$ طولها l وحجمها V. يُقاس جهد الشحنة عند نقطة مراقبة p في إطار إسناد قصوري I. عندما تكون الشحنة ساكنة في I، فإن الجهد عند P يقاس في أي لحظة بالشحنة الكلية e. لكن إذا كانت الشحنة في حالة حركة نسبية بالنسبة إلى I، فإن الجهد عند P لا يقاس بالشحنة الكلية. ولشرح هذا لا يمكننا تحاشي السؤال المفتوح: كيف تحدّث الشحنة الجهد عند نقطة معينة. سوف نفترض أن الشحنة تحدّث الجهد عند نقطة P في كل لحظة بأن تبعث بصورة ثابتة نوعا ما من الإشارات المحدّثة (كما سنرى، التردد المجهول لهذه الإشارات المحدّثة لن يؤثر على حساباتنا). إدراك مثل هذا الافتراض عند استنتاج جهود ليناردـ فايتشيرت يحتاج إلى تبصر وبصيرة نافذة. لقد أحب فريقنا البحثي من أول جزء من الكتاب أن يستكشف الأصل الفيزيائي لجهود ليناردـ فايشيرت. من الممكن فعلا أن يتوصلوا إلى افتراض أن الشحنة تبعث باستمرار نوعا ما من الإشارة لكي تحدّث جهدها ومجالها. والآن يكون من السهل افتراض تحديث الإشارات التي تنقل بسرعة c. في الكهرديناميكا الكمومية، يتكون مجال الشحنة الكهربية من مجموعة فوتونات افتراضية تُبعث وتمتص باستمرار بواسطة الشحنة. المعالَجَة هنا تقليدية، ولكنها، إذا ساعدت، فيمكن اعتبار إشارات التحديث كأنها فوتونات افتراضية.

بدلالة إشارات التحديث، يقاس الجهد عند P في لحظة معينة t في I بواسطة جميع إشارات التحديث التي تبدأ من نقاط مختلفة للشحنة عند لحظات مختلفة، وتصل إلى p في اللحظة نفسها t. يقاس جهد الشحنة الساكنة في I بجميع إشارات التحديث المنبعثة بواسطة نقاط الشحنة المختلفة أثناء الزمن $\Delta t=l/c$ الذي تصل إشارة التحديث خلاله من الطرف الخلفي للشحنة

(بالنسبة إلى p) إلى طرفها الأمامي. بعد أن تصل إشارة الطرف الخلفي والإشارات الصادرة من نقاط أخرى للشحنة إلى نقطة الطرف الأمامي، تتبعث إشارة التحديث الأخيرة من تلك النقطة وتنتقل كل هذه الإشارات نحو P. وتصل آنيا عند P وتحدد الجهد القياسى φ الناشئ هناك عن الشحنة الكلية e.

• P



شكل ٨,١ شحنة متحركة نحو نقطة P بسرعة v بالنسبة إلى إطار إسناد قصورى I. يُقاس جهدها الفعال (التأثيرى) عند P بكل الإشارات المحددة التي تصل آنيًا والتي صدرت عن الشحنة.

إن جهد الشحنة المتحركة نحو P لا يمثل الشحنة الكلية لأن إشارات التحديث تستغرق زمنا(لينارد – فايتشيرت) $\Delta t_{+}^{i,II}$ أكبر لتصل من الطرف الخلفي للشحنة إلى طرفها الأمامي حيث يحدث خلال هذا الزمن أن ينتقل طرف الشحنة الخلفي نحو نقطة طرفها الأمامي، وتكون الشحنة متحركة أيضا في الاتجاه نفسها، وتسرع الإشارة إلى نقطة الطرف الأمامي

(شكل ٨,١). ونتيجة لهذا تنبعث إشارات تحديث *أكثر* أثناء ذلك الزمن، وتصل آنيا عند P. هذا يعني أن الجهد عند P لا يمثل الجهد φ من الشحنة الكلية e، وإنما الجهد *الفعال* φ_+^{LW} الأكبر من φ. في هذه الحالة، يمكن مباشرة حساب الزمن Δt_+^{LW} الذي بعده تصل إشارة الطرف الخلفي إلى شحنة الطرف الأمامي المتحركة بسرعة v ، فيكون:

$$\Delta t_+^{\mathrm{LW}} = \frac{l + v\Delta t_+^{\mathrm{LW}}}{c} .$$

أو

$$\Delta t_+^{\mathrm{LW}} = \frac{l/c}{1 - v/c} .$$

إذا كانت الشحنة تتراجع عند P، فان إشارة التحدث الطرفية الأمامية تستغرق زمنا Δt_-^{LW} أقل لكي تصل إلى الطرف الخلفي للشحنة ويصل عدد أقل من إشارات التحدث *بالتزامن* عند P، مما يعنى أن الجهد هناك لا يمثل الجهدφ من الشحنة الكلية e وإنما يمثل الجهد *الفعال* φ_-^{LW} الذي يكون أصغر من φ. في هذه الحالة يكون الزمن Δt_-^{LW} هو

$$\Delta t_-^{\mathrm{LW}} = \frac{l/c}{1 + v/c} .$$

ويمكن الحصول بسهولة على التعبير المتجهي لزمن لينارد – فايتشيرت على الصورة:

$$\Delta t^{\mathrm{LW}} = \frac{l/c}{1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}} .$$

حيث n متجه وحدة فى اتجاه انتشار إشارات التحديث (نحو نقطة المراقبة). زمن لينارد – فايتشيرت الذي تنبعث خلاله إشارات التحديث المحددة لجهد الشحنة المتحركة يتضمن الطول الظاهري l^{LW} للشحنة على طول الخط الذي يصل الشحنة بنقطة المراقبة، والذي يختلف عن الطول الحقيقي (الفعلي) l. l^{LW} هو الطول الظاهري الذي تنبعث منه جميع إشارات التحديث نحو P وتصل آنيا عند P – وهذه هى المسافة بين الطرف الخلفي للشحنة الذي تنبعث منه إشارة التحديث الأولى والنقطة التي عندها تصل هذه الإشارة إلى الطرف الأمامى للشحنة المتحركة بسرعة c بعد الزمن Δt^{LW} الذي تنبعث فيه إشارة التحديث الأخيرة (انظر شكل ٨,١):

$$l^{\mathrm{LW}} = c\Delta t^{\mathrm{LW}} = \frac{l}{1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}} .$$

هذا يعنى الحجم أن الظاهرى للشحنة، كما يُرى من P يكون:

$$V^{\mathrm{LW}} = \frac{V}{1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}} . \qquad (8.8)$$

عندئذ يكون الجهد عند النقطة P

$$\varphi^{\mathrm{LW}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho V^{\mathrm{LW}}}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho V}{r\left(1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}\right)} .$$

أو

$$\varphi^{\mathrm{LW}}(r,t) = \left|\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e}{r\left(1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}\right)}\right|_{\mathrm{ret}} . \qquad (8.9)$$

وهو جهد لينارد – فايتشيرت القياسي. ρ هى كثافة الشحنة و r موضع تأخر مركز الشحنة. يجب توضيح أن كثافة الشحنة *لا* تتغير. قيم الشحنة، وكثافتها، وحجمها الفعلي V لا تتغير. ويجب أيضا أن نفترض سلفا أنها تظل *كما* هى لكي تستنتج حجم وجهود لينارد- فايتشيرت.

بعد أخذ حجم لينارد فايتشيرت فى الاعتبار (٨,٨) يتضح أن جهد لينارد – فايتشيرت الاتجاهى هو:

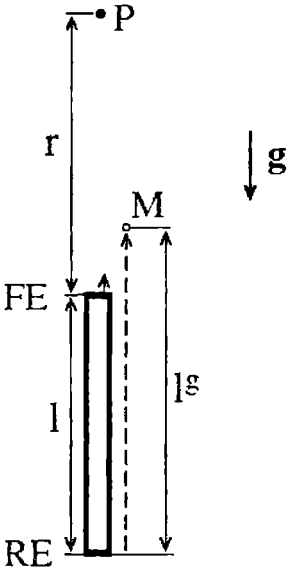
$$\mathbf{A}^{LW}(r,t) = \left| \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 c^2} \frac{\mathbf{v}}{r\left(1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}\right)} \right|_{\text{ret}} \qquad (8.10)$$

حيث r هو الموضع المتأخر للشحنة.

كل من جهد لينارد – فايتشيرت القياسى والمتجهى (٨,٩) و(٨,١٠) لا يعتمدان على حجم الشحنة. لهذا السبب يمكن توضيح أنهما متحققان بالنسبة لشحنة نقطية أيضا. إذا ما كان الحال كذلك، فإن تفسير الأصل الفيزيائى لجهود لينارد – فايتشيرت لن يكون مفهومًا أو معقولاً . الشحنة النقطية نموذج مثالي مفيد، ولكن العديد من الفيزيائيين يشكّون فيما إذا كان مثل هذا الأنموذج موجودًا فى الطبيعة. التفسير الأقوى يمكن استقاؤه من ميكانيكا الكم (الكوانتم)– نذكّر بمناقشة عزم ثنائى القطب لذرة الهيدروجين فى الفصل العاشر. حقيقة أن الجهدين (٨,٩) و(٨,١٠) لا يعتمدان على حجم الشحنة تعنى ببساطة أنهما صحيحان *بأي* حجم.

نحن الآن بصدد اشتقاق المعادلة التي تصف عنصر الحجم اللامتماثل اتجاهيا بطريقة أكثر فيزيائية. الاستنتاج الوارد فى القسم السابق مبنى على مفهوم صناعى "لكرة تجميع المعلومات". اعتبر شحنة $e = \rho l'$ طولها l

ساكنه في N^g . خلال فترة زمنية معينة تبعث جميع نقاط الشحنة إشارات تحديث تصل آنيا إلى نقطة المراقبة P. الآلية التي تحدد الفترة الزمنية التي تنبعث خلالها كل إشارات التحديث التي تصل إلى P آنيا، هى نفسها كما فى حالة جهود لينارد – فايتشيرت. إذا كانت P تبعد مسافة r عن الطرف الأمامى للشحنة،فإن الزمن الذى تنبعث خلاله إشارات تحديث من الشحنة يكون مختلفا عن $\Delta t = l/c$ بسبب سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيا . وإذا كانت P فوق الشحنة، فإن السرعة المتوسطة لإشارات التحديث تكون أصغر من c، وتسهم الشحنة فى نقطة المراقبة لزمن أطول. ويصل المزيد من إشارات التحديث عند P فى اللحظة نفسها. السبب كما يلي:



شكل ٨,٢ شحنة ساكنة في N^g. يحدِّد جهدها الفعال عند P بواسطة جميع إشارات التحديث التي تصل آنيا، وتنبعث من الشحنة، وتكون سرعاتها المتوسطة مختلفة.

تنبعث إشارة تحديث RE من الطرف الخلفي للشحنة (نقطة RE) وتبدأ في الانتشار نحو نقطة المراقبة P (شكل ٨,٢)، سرعتها الحقيقية المتوسطة c^{g}_{RE} هي:

$$c^{g}_{RE} = c\left[1 + \frac{\mathbf{g}\cdot(\mathbf{r}+\mathbf{l})}{2c^2}\right] . \qquad (8.11)$$

حيث **l** متجه يوازي **r**، قيمته تساوي طول الشحنة. تكون السرعة المتوسطة c^{g}_{RE} أقل قليلا من c لأن لدينا $\mathbf{g}\cdot(\mathbf{r}+\mathbf{l}) = -g(r+l)$. أثناء رحلة الإشارة RE نحو P تنبعث إشارات تحديث من جميع نقط الشحنة في اتجاه P أيضا(*). عندما تصل الإشارة RE إلى نقطة M تنبعث الإشارة الأخيرة من الطرف الأمامي للشحنة (نقطة FE) وتصل جميع إشارات التحديث آنيا إلى P. السبب في انبعاث الإشارة الأخيرة من الشحنة عندما تكون الإشارة RE عند النقطة M، وليس عندما تكون عند FE، هو أن السرعة الحقيقية المتوسطة للإشارة FE أكبر قليلا من نظيرتها للإشارة RE:

$$c^{g}_{FE} = c\left(1 + \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right) . \qquad (8.12)$$

بذلك يجب أن تكون الإشارة RE الأبطأ عند M لكي تصل عند P آنيا مع الإشارة FE الأسرع. وبما أن $c^{g}_{RE} < c$ فإن المزيد من الإشارات سوف تنبعث أثناء انتشار الإشارة RE بين النقطتين RE و M، مقارنة بما إذا تحركت الإشارة RE بسرعة مقدارها c.

الزمن الذي تنبعث خلاله جميع إشارات التحديث من الشحنة وتصل آنيا عند P هو:

(*) تنبعث مثل هذه الإشارات في جميع الاتجاهات، لكننا مهتمون فقط بتلك الإشارات التي تنتقل نحو P.

$$\Delta t^{g} = \Delta t_{RP} - \Delta t_{FP}$$
$$= \frac{r + l}{c\left[1 + \frac{\mathbf{g}\cdot(\mathbf{r}+\mathbf{l})}{2c^2}\right]} - \frac{r}{c\left(1 + \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right)}$$
$$\approx \frac{l}{c}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{l}}{2c^2}\right).$$

حيث Δt_{RP} هو الزمن الذى تستغرقه إشارة التحديث RE المنتشرة بسرعة (٨,١١) لتصل إلى النقطة P، و Δt_{FP} هو الزمن الذي تستغرقه الإشارة الأخيرة، المنبعثة من الطرف الأمامي للشحنة والمنتشرة بسرعة مقدارها (٨,١٢)، لتصل إلى نقطة المراقبة P. الطول الظاهري l^{g} الذي تنبعث منه جميع إشارات التحديث التي تصل آنيا عند P، يمكن حسابه بضرب الزمن Δt^{g} في مقدار السرعة المتوسطة لإشارة التحديث المنبعثة من الطرف الخلفى للشحنة. تستخدم السرعة (٨,١١) لأن l^{g}، كما هو مبين فى شكل ٨,٢، هى المسافة بين الطرف الخلفى للشحنة التى تنبعث منها إشارة التحديث الأولى، وموضع (نقطة M) الإشارة المنتشرة نفسها بسرعة (٨,١١)، بعد الزمن Δt^{g}، عندما تنطلق إشارة التحديث الأخيرة من الطرف الأمامى للشحنة. وبناء على ذلك نحصل على l^{g} فيكون:

$$l^{g} = c^{\mathbf{g}}_{RE}\Delta t^{g}$$
$$= c\left[1 + \frac{\mathbf{g}\cdot(\mathbf{r}+\mathbf{l})}{2c^2}\right]\frac{l}{c}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{l}}{2c^2}\right)$$
$$\approx l\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right).$$

أبقينا هنا على الحدود المتناسبة مع c^{-2} فقط. وكما هو متوقع، فإن الحجم الظاهرى للشحنة التى تنتج من l^g يتطابق مع (٨,٦) الناتج بدلالة كرة تجميع المعلومات:

$$V^g = V\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right).$$

التى تؤدى كما رأينا إلى الجهد الصحيح للشحنة الساكنة فى N^g.

$$\varphi^g = \frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right).$$

وهكذا فإننا نعلم الآن كيف يحسب جهد الشحنة المعلقة فى مجال جاذبية. لكن ماذا عن الشحنة المتحركة فى N^g. بما أن الشحنات المتحركة توصف بجهود لينارد – فايتشيرت، فإننا نحتاج إلى تعميمها لحالة أُطر الإسناد اللاقصورية. لهذا الغرض، دعنا نكتب (٨,٩) و(٨,١٠) بدلالة r^g و V^g:

$$\varphi_g^{LW}(r,t) = \left|\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho V^g}{r^g\left(1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}\right)}\right|_{ret}. \qquad (8.13)$$

و

$$\mathbf{A}_g^{LW}(r,t) = \left|\frac{\rho V^g}{4\pi\varepsilon_0 c^2}\frac{\mathbf{v}}{r^g\left(1 - \dfrac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}}{c}\right)}\right|_{ret} \qquad (8.14)$$

يمكن الحصول على جهود لينارد – فايتشيرت المعممة من (٨,١٣) و(٨,١٤) بالتعويض عن r^g و V^g بالمعادلتين (8.5) و(٨.6) على الترتيب:

$$\varphi_g^{LW}(r,t) = \left|\frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0 r}\frac{1}{(1 - \mathbf{v}\cdot\mathbf{n}/c)}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right)\right|_{ret}. \qquad (8.15)$$

$$\mathbf{A}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{LW}}(r,t)=\left|\frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0 c^2 r}\frac{\mathbf{v}}{(1-\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}/c)}\left(1-\frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right)\right|_{\mathrm{ret}}, \qquad (8.16)$$

حيث كما سبق، تشير اللاحقة 'ret' إلى أن الجهود تم تقييمها عند الزمن المتأخر.

و يمكننا إجراء الحسابات نفسها لعنصر الحجم اللامتماثل اتجاهيا ولجهود الشحنة فى إطار متسارع N^{a}. بالنسبة لعنصر الحجم اللامتماثل يمكننا استخدام المعادلة:

$$V^{\mathrm{a}}=V\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right),$$

التى توافق مبدأ التكافؤ. حيث يمكن الحصول عليها أيضا من (٨,٦) باستخدام التعويض $\mathbf{g}=\text{-}\mathbf{a}$.

عندئذ يكون من السهل حساب جهد الشحنة الساكنة فى N^{a} باعتبار (8.14) وحقيقة أنه بسبب(٧,١٥) فى N^{a} يكون لدينا أيضا $r^a=\bar{c}^a t$:

$$\varphi^{\mathrm{a}}=\frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right). \qquad (8.18)$$

و كما فى حالة عنصر الحجم اللامتماثل اتجاهيا، فإن الاستنتاج *المستقل* للمعادلة (٨,١٨) يتحول الى (٨,٧) بالتعويض $\mathbf{a}=\text{-}\mathbf{g}$. وفقا لمبدأ التكافؤ، الشىء نفسه يظل صحيحا بالنسبة لجهود لنيارد – فايتشيرت المعدلة فى N^{a}.

$$\varphi_{\mathrm{a}}^{\mathrm{LW}}(r,t)=\left|\frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0 r}\frac{1}{(1-\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}/c)}\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right)\right|_{\mathrm{ret}}, \qquad (8.19)$$

$$\mathbf{A}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{LW}}(r,t)=\left|\frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0 c^2 r}\frac{\mathbf{v}}{(1-\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}/c)}\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right)\right|_{\mathrm{ret}}. \qquad (8.20)$$

٨,٣ حساب المجال الكهربي لشحنة ما في إطار إسناد لاقصوري

حذف المعامل ½ من الجهد (٨,١) الذي استنتجه فيرمي يُلمح إلى اقتراح حذف المعامل نفسه من المجال الكهربي (٨,٢) المحسوب من ذلك الجهد. يمكننا الآن أن نحقق ذلك. الجهد الكهربى لشحنة ρV^g ساكنة فى N^a يمكن الحصول عليه من الجهد القياسى (٨,٧)

$$\mathbf{E}^g = -\nabla\varphi^g = \frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} + \frac{\mathbf{g}}{c^2 r}\right), \qquad (8.21)$$

حيث $\mathbf{n}=\mathbf{r}/r$. المعامل ½ غير موجود فى (٨,٢١)، كما أزيل التناقض مع مبدأ التكافؤ. وتكمن ميزة حساب المجال الكهربى لشحنة ساكنة فى N^a مباشرة فى N^g فى أن المجال يتم الحصول عليه فقط من الجهد القياسى (٨,٧)، وليس هناك وجود لأزمنة متأخرة.

يتمثل تأثير السرعة الحقيقية المتوسطة (٧,١٤) فى أنه يسبب تشوش المجال الكهربى (٨,٢١) فى N^g. ويجب التاكيد على أنه اذا كان الانتشار غير المتماثل للضوء فى N^a لم يؤخذ فى الاعتبار فإن مراقبًا هناك سوف يحدد أن مجال الشحنة الساكنة فى N^g هو مجال كولوم.

أيضا لا يُحسب المجال الكهربى لشحنة ساكنة في إطار متسارع N^a إلا من الجهد القياسى (٨,١٨) دون اعتبار أزمنة متأخرة.

$$\mathbf{E}^a = -\nabla\varphi^a = \frac{\rho V}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} + \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} - \frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right). \qquad (8.22)$$

يُستنتج المجال (٨,٢٢) فى N^a ويتطابق مع المجال الكهربى (٨,٣) فى N^a لشحنة ساكنة لحظيًا فى إطار إسناد قصورى I (I هو إطار الإسناد المتحرك بالتلازم عند لحظة زمنية معينة فى N^a.) ينشأ تشوه المجال

الكهربى (٨,٣) فى I من تسارع الشحنة بالنسبة الى I. ينشا التشوه نفسه بالضبط لمجال الشحنة المقاس فى N^a بسبب سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيًا (٧,١٥) هناك. تعتبر هذه النتيجة تأييدًا آخر لمطلقية التسارع : يستطيع مراقب فى N^a، حيث تكون الشحنة ساكنة، أن يكتشف التسارع في N^a بتحديد شكل المجال الكهربي للشحنة. يجب أن يكون ذلك الشكل هو نفسه بالنسبة للمراقبين في N^a و I لأنهما يتفقان على أن الشحنة تكون متسارعة (وبتسارع نفسه a).

الحقيقة التي تقضي بأن الانتشار اللامتماثل للضوء في N^a وN^g هو الذي يسبب تشوش المجال الكهربي لشحنة ساكنة في N^a وفي N^g تلقي الضوء على سؤال أساسي آخر: ما الذي يكمن وراء مبدأ التكافؤ؟ عندما تكون الشحنة متسارعة أو معلقة في مجال جاذبية، فإن خطها الكوني في كلتا الحالتين ينحرف عن حالته الجيوديسية، ويكون تشوه الخطوط الكونية واحدًا للحالة a=-g. بالقرب المباشر من الخطوط الكونية لشحنة متسارعة وشحنة ساكنة فى مجال جاذبية يكون كل شيء هو نفسه – انتشار الضوء فى إطاري الإسناد N^a و N^g مصحوبا بخطوط كونية متساوية التشوه للشحنة المتسارعة والشحنة المعلقة فى مجال جاذبية (للحالة a=-g) يكون متساوى اللامتماثل. وهذا يؤدى إلى مجالين متساويي التشوش للشحنتين ولتأثيرات أخرى متساوية، كما سنرى هنا بإيجاز وفى الفصل التاسع أيضا. ويمكن الاعتراض بأن هذا التفسير يظل صحيحا فقط بالنسبة للظواهر الكهرمغناطيسية. سوف نرى فى الفصل التاسع أن التوضيح نفسه يظل قائما لجميع التأثرات. ويمكن استنتاج السرعة المتوسطة اللامتماثلة اتجاهيا لانتشار أى تأثر بالطريقة نفسها التى اتبعت تماما بالنسبة للتأثر الكهرمغناطيسي.

بما أن الحركة المتسارعة مطلقة وشكل المجال الكهربى لشحنة متسارعة واحد بالنسبة لمراقب قصورى ولاقصورى، فإن من الطبيعى أن يُتَوَقّع أن مجال شحنة ما قصورية، هو مجال كولوم، يكون واحدا لمراقب قصورى ولاقصورى. دعْنا أولا نختبر صحة ما إذا كانت هذه هى الحالة الواقعية فى N^a. اعتبر شحنة قصورية (ليست متسارعة) تبدو كأنها تسقط فى N^a بعجلة ظاهرية $a^*=-a$، حيث a هو التسارع الحقيقي للإطار N^a. تخيل أن N^a مصحوب بسفينة فضائية متسارعة تبدو فيها الشحنة ساقطة. يصاحب إطار الإسناد القصورى I سفينة فضاء أخرى تتحرك بالقصور الذاتى وتبدو ساكنة بالنسبة للشحنة. *فى الواقع*، الشحنة لا تكون متسارعة (ساقطة) نحو أرضية سفينة الفضاء المتسارعة،؛ وإنما أرضية تلك السفينة الفضائية هى التى تقترب من الشحنة.

يتم الحصول على المجال الكهربى للشحنة الساقطة المعتبرة ساكنة لحظيا(*) فى N^a من جهود لينارد – فايتشرت المعممة (٨,١٩) و(٨,٢٠) فى مدى الحدود المتناسبة مع c^{-2}:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi_{\mathrm{a}}^{\mathrm{LW}} - \frac{\partial \mathbf{A}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{LW}}}{\partial t}$$

$$= \frac{e}{4\pi\varepsilon_0}\left[\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} + \frac{\mathbf{a}^*\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} - \frac{\mathbf{a}^*}{c^2 r}\right) + \left(\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} - \frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\right] .$$

(*) نعتبر المجال الكهربى اللحظى للشحنة لكي نفصل انكماشها الطولى عن التشويشات التى يسببها: (i) تسارعها الظاهرى فى Na و(ii) الانتشار اللامتماثل اتجاهيا للضوء هناك.

بملاحظة أن $\mathbf{a}^*=-\mathbf{a}$ ، فإن هذا يثبت أن المجال الكهربي اللحظي للشحنة الساقطة كما وصفت في N^a يكون متطابقا مع مجال الشحنة القصورية المُقاس في إطارها الساكن:

$$\mathbf{E} = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mathbf{n}}{r^2}\,.$$

توضح هذه النتيجة أن كلا من المراقب القصوري I والمراكب اللاقصوري الساكن في N^a يلاحظان أن المجال الكهربي اللحظي للشحنة الساقطة هو مجال كولوم. بمقارنة المجال الكهربي (٨,٢٢) لشحنة ساكنة في N^a (مقاسة في N^a) ومجالها (٨,٣) المحدد في I الذي تكون فيه الشحنة ساكنة لحظيًا، يتضح بالنسبة لكلا المراقبين في I وN^a أن مجال الشحنة مُشوَّش بالتساوي. ولهذا يوجد اتصال وحيد بين شكل المجال الكهربي لشحنة وحالته القصورية: إذا مُثِّلَت شحنة بخط كوني جيوديسي (مما يعني أنها تتحرك بالقصور الذاتي) فإن مجالها يكون مجال كولوم – كل من المراقب القصوري I والمراقب اللاقصوري N^a يكتشفان المجال نفسه (الكولومي). إذا لم يكن الخط الكوني للشحنة جيوديسا (بمعنى أن الشحنة لا تتحرك بالقصور الذاتي وتقاوم تسارعها)، فإن مجالها الكهربي يتشوَّش– ويلاحظ كل من I وN^a المجال الكهربي المُشوَّش نفسه.

اعتبر الآن شحنة ساقطة في مجال الجاذبية الأرضية (أي في N^g) بتسارع ظاهري g. بالنسبة لمراقب قصوري I يسقط مع الشحنة لا يكون مجالها مشوَّشًا – إنه مجال كولوم. والسؤال يكون عما إذا كان سوف يتشوَّش في N^g. كما فعلنا في حالة شحنة تسقط في N^a، دعنا نحسب المجال الكهربي

لشحنة نعتبرها ساكنة لحظيًا[*] في N^g. يمكن الحصول عليه أيضًا من جهود لينارد – فايتشيرت المعممة (٨,١٥) ، (٨,١٦) على الصورة

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi_a^{LW} - \frac{\partial \mathbf{A}_a^{LW}}{\partial t}$$

$$= \frac{e}{4\pi\varepsilon_0}\left[\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} + \frac{\mathbf{a}^*\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} - \frac{\mathbf{a}^*}{c^2 r}\right) + \left(\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} - \frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\right].$$

التي تُختزل بوضوح إلى مجال كولوم.

$$\mathbf{E} = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mathbf{n}}{r^2}.$$

بناء على ذلك لا يكون المجال الكهربي اللحظي لشحنة ساقطة في N^g مشوّشًا. هذه النتيجة تُلقي الضوء على ثلاث مسائل مهمة:

• العلاقة التي تصل بين شكل المجال الكهربي لشحنة وحالتها القصورية. كما في حالة شحنة موصوفة في إطار إسناد متسارع N^a، هنا أيضًا يكون المجال الكهربي لشحنة ساقطة في N^g هو مجال كولوم *لكل* من مراقب قصوري I يسقط مع الشحنة ومراقب ساكن في N^g. ويكون المجال الكهربي (٨,٢١) لشحنة ساكنة في N^g ومقاسة هناك مشوّشًا. كما يكون مجال شحنة ساكنة في N^g مقاسة في إطار إسناد قصوري I يسقط في N^g (وساكن لحظيًا في N^g) مشوّشًا مثل (٨,٢١)، لم نحسبه هنا، لكن مثل هذا الحساب يكافئ حساب مجال شحنة متسارعة في I [١١٦]. وبهذا يجب استخدام التعويض $\mathbf{a}=-\mathbf{g}$ في المعادلة (٨,٣) للحصول على مجال الشحنة الساكنة في N^g

(*) مرة أخرى، السبب الوحيد لاعتبار المجال الكهربي اللحظي هو استبعاد تشوه المجال الكهربي بسبب انكماش الطول، وفحص التشويش الحادث فقط بسبب: (i) التسارع الظاهري للشحنة في Ng و(ii) الانتشار اللامتماثل اتجاهيًا للضوء هناك.

والمقاسة في I. لهذا فإن شكل المجال الكهربي للشحنة لا يعتمد على حالتها القصورية ويكون مطلقًا – كلا المراقبين القصوري واللاقصوري يتفقان على اعتبار أي شحنة تكون قصورية وأيها غير قصورية بالنظر إلى شكل المجالين اللذين تسببهما الشحنة. مجال الشحنة القصورية التي يكون خطها الكوني جيوديسيًا يكون مجالاً كولوميًا، بينما يكون المجال مشوّشًا في حالة شحنة لاقصورية (متسارعة أو معلقة في مجال جاذبية) خطها الكوني مشوّه (ليس جيوديسيًا).

• السؤال عما يتعلق بسبب سقوط شحنة ما *بذاتها* في مجال جاذبية، طبقًا للنسبة العامة، دون أن تؤثر قوة عليها. كما توضح المعادلة (٨,٢٣). الطريقة الوحيدة التي تعوض بها شحنة ما اللاتماثل في انتشار اضطرابات كهرمغناطيسية وتحفظ الشكل الكولومي لمجالها الكهربي هي أن تسقط بتسارع g. إذا كانت الشحنة ممنوعة من السقوط، فإن مجالها الكهربي يُشَوَّش وتبدأ قوة ذاتية ناشئة عن المجال المشوّش في التأثير على الشحنة دافعة إياها للحركة (السقوط) بطريقة تستعيد فيها مجالها الكولومي، كما سوف نرى في الفصل التاسع. هذا يؤدي إلى اختفاء القوة الذاتية. باختصار، السبب في أن شحنة ما تسقط في مجال جاذبية هو أن تمنع مجالها من أن يُشوّش بفعل الانتشار اللامتماثل اتجاهيًا للضوء هناك(*).

(*) من الشائق افتراض أن مجال شحنة ما يواصل السقوط عندما تُمنع من السقوط في مجال جاذبية. عندئذ تسقط الشحنة أيضًا لكي تحافظ على الشكل الكولومي لمجالها بالمكوث عند مركزه. لكن إذا ما كان الحال كذلك فإن سرعة أي اضطرابات في المجال الكهربي الساقط سوف تزداد في اتجاه موازٍ للتسارع g وتتناقص في الاتجاه المعاكس. لكن كما رأينا في قسم ٤,٧، الضوء الساقط في مجال جاذبية يتباطأ. المجال الكهربي لشحنة ما في مجال جاذبية لا يسقط، وإنما يُشوّش فقط.

• السؤال عما إذا كانت شحنة ما ساقطة في مجال جاذبية تـشعّ أم لا. النتيجة التي تقضي بأن المجال الكهربي اللحظي لـشحنة سـاقطة لا يكـون مشوّشًا تعتبر تفسيرًا جديدًا في النقاش حول ما إذا كانت الشحنة الساقطة فـي مجال جاذبية تـشعّ أم لا [١٦، ص ٩٣]، [٥٠، ١٠٧، ١١٨، ١١٩، ١٢٠، ١٢١، ١٢٢]. واضح من (٨,٢٣) أن الشحنة الساقطة لا تـشع لأن مجالهـا الكهربي لا يحتوي على حدود الإشعاع r^{-1}، وإذا كانت هذه الحدود موجودة في مجال الشحنة الساقطة، فإن هذا سوف يشكل تناقضًا مع مبدأ التكافؤ، لأن مجال شحنة ساقطة في إطار متسارع N^a هو مجال كولوم، ولهذا فإنه لا يشع – تتحرك الشحنة بسرعة ثابتة ويكون الإطار N^a هو الذي يقترب من الشحنة ويعطي الانطباع بأن الشحنة هي التي تسقط في N^a.

٨,٤ ملخص

لقد اتضح أن المجال الكهربي لشحنة مـا وجهـدها يمكـن حـسابهما مباشرة في أُطر إسناد لاقصورية بدون الحاجة إلى تحويل المجال من إطـار متحرك بالتلازم إلى إطار قصوري موضعى، وذلك بأن يؤخذ فى الاعتبـار الانتشار اللامتماثل اتجاهيا للضوء في أُطر إسناد لاقصورية.

واتضح أيضا أن شكل المجال الكهربي لشحنة ما يعتمد علـى حالتـه القصورية ويكون *مطلقا*، لأن كلا المـراقبين: القـصورى واللاقـصورى، يحددان أن مجال الشحنة القصورية، الذي يكون خطها الكـوني جيوديـسيًا، هو مجال كولومى، بينما الشحنة اللاقصورية ذات الخط الكوني المشوه يكون مجالها مشوّشًا.

الفصل التاسع

القصور الذاتي كدليل على واقعية الزمكان

إن قضايا القصور الذاتي والجاذبية (الثقالية) ظلت الألغاز الأكثر أهمية في الفيزياء لعدة قرون. حتى الآن، مع بدايات القرن الواحد والعشرين، لا يزال الوضع كما هو – تبقى طبيعة القصور الذاتي سرًا عصيًّ الحل في الفيزياء الحديثة، وفهمنا للجاذبية (الثقالة) يمكن وصفه غالبا الطريقة نفسها، لأن نظرية الجاذبية الحديثة، النسبية العامة، لم تضف كثيرا إلى *فهمنا* لآلية التآثر الجاذبى. النسبية العامة، التي توفر تفسيرا سلسًا، بسيطا وجميلا بدرجة مدهشة، للتآثر الجاذبي للأجسام التى تسلك مسارات جيوديسية، تبقى صامتة عن أسئلة مهمة من قبيل: كيف تحني المادة الزمكان، وما هي طبيعة القوة التي نعرفها بأنها جاذبية – القوة المؤثرة على جسم ينحرف عن مسارة الجيوديسى بينما يكون ساكنا فى مجال جاذبية. لقد أُلقى الضوء أكثر على سر الجاذبية بالحقيقة التى تقضى بأن الأسئلة المفتوحة عن القصور الذاتي والجاذبية تبدو مرتبطة بإحكام، لأن تفسير ما يسمى بقوة الجاذبية الذي يعكس على نحو أفضل روح النسبية العامة يوحي بأن هذه القوة فى الحقيقة قصوريه [١٢٣]. وهذا من الطبيعى أن يشرح السبب 'فى عدم وجود شىء مثل قوة الجاذبية' فى النسبية العامة [١٢٤].

يعرِّف القصور الذاتي بأنه المقاومة التى يبديها جسيم ما لتسارعه. هذه المقاومة تُظهر نفسها كقوة – القوة القصورية $\mathbf{F}^{a}$ – تعاكس القوة الخارجية التى تسرِّع الجسيم. القوه القصورية تتناسب سلبيا مع تسارع الجسيم **a**:

$$\mathbf{F}^{a} = -m^{in}\mathbf{a}\,,$$

حيث معامل التناسب m^{in} هى الكتلة القصورية للجسيم، التى تعرف بأنها *القياس* لمقاومة الجسيم الذي يبديها لتسارعه.

تنشأ القوى القصورية $\mathbf{F}^{a}$ متى تشوّه الأنبوب الكوني للجسيم، أي انحرف عن شكله الجيوديسي. القوة الثقالية هى

$$\mathbf{F}^{g} = m^{g}\mathbf{g}\,,$$

حيث m^{g} هي كتلة الجسيم الثقالية المطاوعة، تنشأ أيضًا متى تشوّه الأنبوب الكوني لجسيم ساقط في مجال ثقالي. وهذا يحدث عندما يُمنع الجسيم من متابعة مساره الجيوديسي؛ على سبيل المثال، إذ كان الجسيم على سطح الأرض فإنه يمنع من السقوط ويكون أنبوبه الكوني مشوهًا (غير جيوديسي). وعلى هذا تكون الكتلة الثقالية المطاوعة أيضًا مقياسًا للمقاومة التي يبديها الجسيم الساقط عند منعه من فعل ذلك. من الواضح أن تشوه الأنبوب الكوني لجسيم لاقصوري (متسارع أو معلق في مجال ثقالي)، تنشأ عنه قوة قصورية. ولكن قبل الاستطراد في استكشاف هذه الرابطة، دعنا نوجه السؤال الخلافي الذي لا يزال مثيرًا للجدل حول واقعية القوى القصورية.

٩,١ هل القوى القصورية واقعية؟

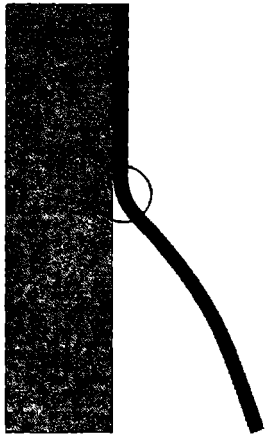
اعتبر سفنيتين فضائيتين A ,B في حالة سكون بالنسبة لبعضهما. تخيل أن هناك كرة طافية بداخل A. في لحظة معينة بدأت السفينة A في التسارع. يمكننا تحديد ما إذا كانت هناك أي قوة واقعية تؤثر على الكرة وذلك بأن تؤخذ في الاعتبار الكيفية التي يصف بها المراقبان في A وB ما يحدث للكرة (وبالطبع يمكننا قياس وجود أي قوة).

سوف يرى المراقب الموجود في A أن الكرة تتسارع أثناء سقوطها نحو أرضية السفينة الفضائية، وربما يفترض أن هناك قوة تؤثر على الكرة وتدفعها إلى السقوط. هذا الافتراض يبدو أكثر احتمالاً عندما ترتطم الكرة بالأرضية وتبدأ في بذل قوة عليها (أي تبدأ الكرة في أن يكون لها 'وزن') حينئذ يمكننا قياس هذه القوة. ربما يقول المراقب A أن هذه القوة هي القوة نفسها التي سببت سقوط الكرة. عندئذ يظهر أن المراقب A قادر على تفسير طبيعة تلك القوة بطريقتين – إما أن تكون القوة خيالية (كما يزعم البعض)، أو تكون واقعية (كما يعتقد آخرون). وكلا القولين خطأ، بسبب الفرض الخاطئ الذي يقضي بأن القوة التي تؤثر بها الكرة على الأرضية هي نفسها المسببة أيضًا لسقوط الكرة.

وما إن يأخذ المراقب A في الاعتبار حقيقة أن التسارع مطلق وأن السفينة الفضائية A هي التي غيرت حالة حركتها، فإن التفسير السليم يصبح واضحًا جليًا – ليس هناك أي قوة مؤثرة على الكرة 'الساقطة'، وإنما تنشأ قوة

قصورية واقعية في الكرة عند لحظة لمسها أرضية السفينة وبداية تسريعها، لكي تقاوم بها تسارعها. ويتحقق هذا واقعيًا على نحو أفضل عندما ننظر إلى ما يراه المراقب الموجود في السفينة B. بالنسبة للمراقب B لا يحدث أي شيء للكرة عندما تبدأ A في التسارع، لأنها تواصل الطفو في A ولا تغير من حالة حركتها. إن أرضية A هي *في الواقع* التي تقترب من الكرة. لكن الأشياء تتغير عندما يرى المراقب B أن أرضية السفينة A تصل إلى الكرة. تبدأ الأرضية في تسريع (تعجيل) الكرة وتقاوم الكرة التغير في حالة حركتها. وبذلك تظهر القوة الواقعية في الكرة، والتي تؤثر عكسيا على الأرضية. يتضح من شكل ٩,١ أن القوة تنشأ فقط عندما يتشوه الأنبوب الكوني للكرة الأرضية بواسطة الأنبوب الكوني F لأرضية السفينة الفضائية F.

شكل ٩,١ سفينة فضائية متسارعة A ممثلة بأنبوبين كونيين لأرضيتها (F) وسقفها (C). توصف الكرة داخل A بأنبوبها الكوني B. يفترض أن يكون التصادم بين الكرة وأرضية السفينة الفضائية تصادمًا غير مرن.



شكل ٩,٢ الأنبوب الكوني لكرة تسقط نحو سطح الأرض يكون مشوّهًا بواسطة الأنبوب الكوني للأرض. الأنبوب الكوني للكرة في الجزء العلوي من الشكل يكون مستقيمًا، ولكن الأنبوب الكوني المستقيم لا يكون جيوديسيًا. ومن ثم يكون مشوهًا، لأن الزمكان بالقرب من الأنبوب الكوني للأرض يكون منحنيًا. أما الأنبوب الكوني للكرة في الجزء السفلي من الشكل فيكون جيوديسيًا، ومن ثم ليس مشوهًا. من المفترض أيضا أن يكون التصادم بين الكرة وسطح الأرض تصادمًا غير مرن.

إذا أراد المراقب A أن يصف 'سقوط' الكرة بدلالة القوة، فإنه يستطيع صوريا أن يقدم قوة تخيلية (افتراضية) تصبح 'واقعية' عند لحظة ارتطام الكرة بأرضية السفينة. لكن الجدل بشأن واقعية القوى القصورية يؤكد أن مثل هذه المقاربة الصورية الشكلية تؤدى في الأغلب إلى غموض ولبْس.

يحدث الموقف نفسه مع كرة تسقط نحو سطح الأرض. الأنبوب الكوني للكرة جيوديسي مما يعنى غياب تأثير أي قوة على الكرة الساقطة وأنها تتحرك بالقصور الذاتي.

لكن القوى القصورية(*) الحقيقية تظهر عندما تصل الكرة إلى سطح الأرض . وكما هو الحال بالنسبة لكرة في سفينة فضائية متسارعة، تنشأ القوى القصورية عندما يكون الأنبوب الكوني للكرة مشوهًا. في هذه الحالة يكون سبب التشوه هو الأنبوب الكوني الضخم للأرض ، كما هو مبين فى شكل ٩,٢٠.

يوضح الوصف السليم لسلوك كرة في إطار إسناد لاقصورى للسفينة الفضائية أو الأرض أنه لا توجد أي قوة مؤثرة على الكرة الساقطة، وأن القوة تنشأ في الكرة عندما تحيد عن حالتها الجيوديسية.

٩,٢ تنبع القوى القصورية من إجهاد رباعي الأبعاد ناشئ في الأنابيب الكونية المشوهة لأجسام لاقصورية

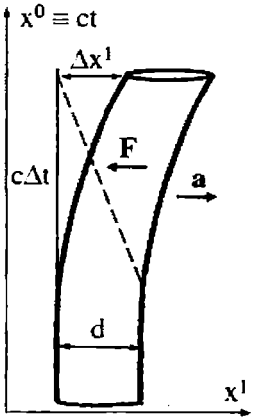
رأينا فى الشكلين ٩,١ و٩,٢ أن القوة القصورية فى الكرة تنشأ فى كلتا الحالتين حالما يكون أنبوبها الكوني مشوهًا. تؤدى هذه الملاحظة طبيعيًا إلى السؤال عن واقعية الأنبوب الكوني للكرة. إذا كان الجسم حقيقيا رباعي الأبعاد، فإن القوى القصورية تصبح قوة استردادية تحاول استعادة الشكل الجيوديسى لأنبوب الكرة الكوني المشوه. تنشأ هذه القوة الاستردادية من إجهاد رباعي الأبعاد ينشأ في الأنبوب الكوني المشوه للكرة .

نرى في شكل ٩,١ أن الأنبوب الكوني للكرة يكون بالغ التشوه في المساحة المحددة بالدائرة؛ تلك المساحة تناظر اللحظة التي عندها تصطدم الكرة بأرضية السفينة الفضائية A. (في الحقيقة، الأرضية هي التي تصدم الكرة). وبسبب التشوه الأعظم للأنبوب الكوني في المساحة المحاطة بالدائرة، تكون قوة الاسترداد هناك أعظم أيضًا من قوة الاسترداد في الأنبوب الكوني للكرة بعد التصادم بين الكرة والأرضية. وهذا يناظر تماما ما يحدث في الواقع –

(*) القوة قصورية لأن الكرة ممنوعة من الحركة بدون مقاومة (أي بالقصور الذاتي).

القوة القصورية التي تؤثر بها الكرة في الاتجاه المعاكس على الأرضية عندما تصدمها الأرضية تكون أعظم من القوة القصورية التي تقاوم بها الكرة تسارعها بعد تلك اللحظة. والسبب في ذلك هو أن الأنبوبين الكونيين للكرة والأرضية يكونان زاوية نتيجة لمقدار السرعة النسبية بينهما، كما هو مبين في شكل ٩,١، ويتشوه الأنبوب الكوني للكرة بدرجة أكبر في المساحة المحاطة بدائرة لكي ينضبط ويتكيف مع الأنبوب الكوني للأرضية ، وبعد ذلك، تكون قوة الاسترداد في الأنبوب الكوني للكرة أصغر، لأن الأنبوب الكوني للكرة ينضبط فقط مع انحناء الأنبوب الكوني للأرضية، ونتيجة لذلك يكون تشوهه أصغر.

في حالة كرة تسقط في المجال الثقالي للأرض (شكل ٩,٢) يكون تشوه أنبوب الكرة الكوني مرة ثانية أعظم في المساحة المحاطة بدائرة والمناظرة للحظة اصطدام الكرة بسطح الأرض. قوة الاسترداد في تلك المساحة أكبر من قوة الاسترداد المقاومة لتشوه الأنبوب الكوني للكرة بعد حادثة الاصطدام بين الكرة وسطح الأرض. وهذا، مرة ثانية، هو ما يحدث في الواقع – تصدم الكرة سطح الأرض بقوة أكبر من القوة (وزنها) التي تبذلها على السطح بعد لحظة الصدم.



شكل٩,٣ قوة استرداد F تنشأ في الأنبوب الكوني المشوّه لجسيم متسارع

القوى الاسترادادية التي تنشأ في جسم مرن مشوه معرض لإعادة التشكل يمكن وصفها بدلالة ممتد إجهاد. وفى حالة الأنبوب الكوني المشوه رباعي الأبعاد لجسيم لاقصوري يكون ممتد الإجهاد رباعي الأبعاد هو:

$$\sigma_{\beta}^{\alpha} = \frac{F^{\alpha}}{V^{\beta}} .$$

وهذه الصيغة تمثل قوه F مركبتها F^{α} في عكس الاتجاه α الذي تعمل فيه القوه الخارجية . تُطَبَّق القوتان الخارجية والاسترادادية على الحجم ثلاثي الأبعاد V^{β} الذي يقع عموده في الاتجاه β. وكما في حالة تشوه جسم ثلاثي الأبعاد، يوصف تشوه الأنبوب الكوني بواسطة ممتد انفعال(*) N_{β}^{α}. ويكون ممتد الإجهاد متناسب مع ممتد الانفعال:

$$\sigma_{\beta}^{\alpha} = \varepsilon u_{\beta}^{\alpha} . \qquad (9.1)$$

حيث يعتمد معامل التناسب ε على خصائص المرونة للأنبوب الكوني للجسم.

اعتبر الأنبوب الكوني لجسيم قطره d وتسارعه في الاتجاه x^1، مما يعنى أن قوة الاسترداد تعمل في الاتجاه المعاكس (شكل ٩,٣). عندئذ يكون ممتد الإجهاد هو

$$\sigma_0^1 = \frac{F^1}{V^0} . \qquad (9.2)$$

(*) ممتد الانفعال strain stress ممتد من الرتبة الثانية مركباته الانفعالات التسعة الممكنة. والانفعال تغير نسبي يحدث في أبعاد الجسم نتيجة وقوعه تحت تأثير إجهاد [المترجم] .

حيث V^o الحجم العادي الذي يقع عموده على طول الاتجاه الزمني. ممتدة الانفعال تصف تشوه الأنبوب الكوني للجسيم :

$$u_0^1 = \frac{\Delta x^1}{\Delta x^0} = \frac{\Delta x^1}{c\Delta t} .$$

لإيجاد u_o^1، افترض، عند اللحظة التي يبدأ فيها الجسيم في التسارع (بداية تشوه أنبوبه الكوني)، أن إشارة ضوئية انبعثت من عنصر حجم موضوع عند الطرف الأمامي لجسيم بالنسبة لتسارعه. بعد زمن $\Delta t = d / c$ تصل الإشارة الضوئية إلى حيث يكون عنصر الحجم عند الطرف الخلفي للجسيم فى المكان الذى لا يكون فيه الجسم متسارعًا. ونتيجة لتسارع الجسيم، يزاح الطرف الخلفى لعنصر الحجم عن موضع اتزانه بمقدار

$$\Delta x^1 = \frac{1}{2} a\Delta t^2 .$$

وتعاكس قوة الاسترداد تلك الإزاحة. الآن يمكننا الحصول على معادلة صريحة لممتد الانفعال على الصورة:

$$u_0^1 = \frac{\Delta x^1}{c\Delta t} = \frac{1/2(a\Delta t^2)}{c\Delta t} = \frac{d}{2c^2} a . \qquad (9.3)$$

وبأخذ المعادلات (٩,١) و(٩,٢) و(٩,٣) فى الاعتبار، تكون قوة الاسترداد، التى تحاول أن تعيد كل عناصر الحجم للجسيم إلى مواضع اتزانها، هى:

$$F^1 = \frac{\varepsilon V^0 d}{2c^2} a .$$

وبما أن قوة الاسترداد $\mathbf{F} = -F^1\mathbf{i}$ و $\mathbf{a} = a\mathbf{i}$، حيث $\mathbf{i}$ متجه الوحدة فى الاتجاه x^1، فإنه يمكننا كتابة قوة الاسترداد فى صيغة متجهية:

$$\mathbf{F} = -m^{\text{in}}\mathbf{a}\,. \tag{9.4}$$

حيث يمكننا تفسير المعادلة

$$m^{\text{in}} = \frac{\varepsilon V^0 d}{2c^2}$$

على أنها الكتلة القصورية للجسيم المتسارع، لأنها مقياس المقاومة التي يبديها أنبوب الجسيم الكونى لتشوهه. وبدلالة لغة الأبعاد الثلاثية العادية، يكون m^{in} مقياسا للمقاومة التى يبديها الجسيم لتسارعه.

قوة الاسترداد (٩,٤) لها صيغة القوة القصورية المؤثرة نفسها على الجسيم المتسارع. وهذه نتيجة مشجعة، يمكنها أن تفسر السبب فى أن القصور الذاتي ظل لفترة طويلة سرًّا غامضا. ولم يتم التحقق من أن القضية الخاصة بأبعاد الكون يمكن أن تكون وثيقة الصلة بعدد من الأسئلة المفتوحة فى الفيزياء. وكما هو الحال بالنسبة لحل لغز آخر – عدم وجود حركة مطلقة لأن الكون رباعى الابعاد(*) – فإن القصور الذاتي يبدو تأكيدا آخر وتأييدًا لبُعديَّة الكون الرباعية، حيث إنها تنشأ من إجهاد رباعى الأبعاد فى الأنبوب الكونى المشوه لجسيم لاقصورى.

لكن الأمر غير المشجع هو أننا على ما يبدو لا نستطيع التحرك إلى أبعد من استنتاج المعادلة (٩,٤). ولكى نذهب إلى ما هو أبعد من المعالجة الظاهراتية، يجب علينا أن نفحص التأثرات المسببة لإجهاد رباعى الأبعاد فى الأنبوب الكونى المشوه لجسيم لاقصورى. وهنا يساعدنا للمرة الثانية

(*) إذا ما كان الكون ثلاثى الأبعاد فإنه يجب أن يكون هناك حركة مطلقة، كما رأينا فى الفصل الثالث.

قياس بقضيب مشوه ثلاثى الأبعاد. وما يؤدي إلى ظهور قوة الاسترداد والإجهاد ثلاثى الأبعاد فى القضيب هى قوى كهربية استاتيكية تحاول إعادة جميع ذرات القضيب إلى مواضع اتزانها التى غادرتها عندما كان القضيب مشوهًا. وبهذا تكون الآلية المسئولة عن المقاومة التى يبديها قضيب ثلاثى الأبعاد لتشوهه هى *إزاحة* ذرات القضيب عن مواضعها الطبيعية (مواضع اتزانها) التى تشغلها عندما يكون القضيب غير مشوّه. وتتسبب تلك الإزاحة في اضطراب توازن جميع القوى الكهربية التى تمسك بالذرات مجتمعة معا فى القضيب وتؤدي إلى ظهور قوى كهربية استردادية تحاول أن تستعيد التوازن بإعادة الذرات إلى مواضع اتزانها.

يبدو أن هذه الآلية نفسها ذات الأصل الكهرمغناطيسي هى التى تسبب أيضا المقاومة التى يبديها الجسم المتسارع لتسارعه. وحالما أن ذراته تنحرف دائما عن مواضع اتزانها (نتيجة لتسارع الجسم)، فإنه يمكن الاعتقاد بأن قوة الاسترداد فى الأنبوب الكونى المشوه للجسم المتسارع كأنها ناشئة من القوى الكهربية الاستاتيكية فى الجسم، والتى تقاوم انحراف ذرات الجسم عن المواضع التى تشغلها عندما لا يكون الجسم متسارعًا. بكلمات أخرى، تنحرف الخطوط الكونية للذرات التى يشملها الأنبوب الكونى المشوّه للجسم المتسارع عن أشكالها التى كانت عليها عندما يكون الأنبوب الكونى غير مشوّه، والقوى الكهربية التى تحاول أن تعيد الذرات ثانية إلى مواضع اتزانها تحاول أيضا استرداد شكل الخطوط الكونية للذرات.

ربما يبدو للوهلة الأولى أن القصور الذاتي ينشأ كلّيةً من القوى الكهربية الاستاتيكية نفسها التى تمسك بذرات الجسم الجاسئ (الجامد) معًا. وبما أن ذرات الجسم تظل باقية فى مواقع اتزانها بواسطة قوى كهربية، فإن القوى الكهربية نفسها تحاول استعادة الذرات ثانية عندما تنحرف الذرات عن هذه المواقع، وينشأ عن هذا قوة استردادية. من ناحية أخرى، يتضح أنه لا يمكن تعريف هذه القوة الاستردادية بالقوة القصورية *الكلية* التى تقاوم تسارع

الجسم. والسبب يكمن فى أن شدة الروابط بين الذرات فى الجسم أصغر كثيرا من الشدة المطلوبة لحساب القوة القصورية الكلية. لكن يجب التأكيد على أن القوى الكهربية الاستاتيكية الاسترادادية التى تحاول استعادة ذرات جسم متسارع إلى مواضع اتزانها موجودة، ولكنها لا تشكّل إلا كسر صغير فقط من القوة القصورية التى تقاوم تسارع الجسم.

هناك تفسير آخر يوضح السبب فى أن القوى الكهربية، التى تنشأ عندما تزاح ذرات جسم متسارع عن مواقعها غير المتسارعة، لا يمكن تعريفها بالقوة القصورية الكلية – هذه القوى لا تفسر أصل القصور الذاتى لذرات حرة ومفردة ، وبروتونات، وإلكترونات، إلى آخره. هذه القوى لا تستطيع أن تفسر أيضا القصور الذاتى للجسيمات المتعادلة. ومع ذلك، فإن العنصر الأساسى لآلية المقاومة التى يبديها قضيب مشوه ثلاثى الأبعاد طالما كان مشوها – وهو وجود قوى استرداد تحاول إعادة الجسيمات المكونة للقضيب ثانية إلى مواضع اتزانها – لا يمكن إغفاله. يكمن السبب فى أن آلية الاسترداد هذه تكون دائما موجودة فى أى جسيم أولى يتسارع ويمتلك أى نوع من الشحنة – كهربية، قوية، ضعيفة أو ثقالية.

لبيان السبب والكيفية التى تكون بها آلية الاسترداد مسئولة عن القصور الذاتى لجسيمات أولية حرة، دعنا نبدأ بالتأثرات الكهرمغناطيسية ونفحص قصور الإلكترون الذاتي. تتمثل المشكلة فى أننا نجهل ماهيّة الإلكترون. وهذا هو السبب فى أننا سوف نناقش أبسط نموذجين – النموذج الكلاسيكى للإلكترون، والذى على أساسه يكون الإلكترون غلافا دائريا صغيرا لشحنة كهربية سالبة، والنموذج المعيارى(*) الذى تكون فيه الشحنات أشبه بنقط.

(*) النموذج المعيارى standard model نظرية حديثة لوصف منشأ وخصائص بعض الظواهر أو العمليات أو التأثرات التى تحدث فى العالم الفيزيائى. تشمل تأثرات الجسيمات الأولية المكونة للمادة التأثرات الكهرومغناطيسية، والنووية الضعيفة والقوية، بالإضافة إلى التأثر الثقالي. ووسائط هذه التأثرات على الترتيب هى الفوتونات، وبوزونات w+ و w–و zo، والجليونات، بالإضافة إلى الجرافيتونات [المترجم].

اعتبر أولا الإلكترون الكلاسيكى. عندما يكون الإلكترون فى حالة سكون فى إطار إسناد قصورى، أو يتحرك بسرعة ثابتة، فإن التنافر المتبادل لعناصر غلاف كروى مشحون يتلاشى تماما ولا يوجد صافى قوة مؤثرة على الإلكترون. لكن عندما يتسارع الإلكترون الكلاسيكى فإن جميع عناصر الغلاف الكروى تزاح عن مواضعها غير المتسارعة ويضطرب الاتزان فى التنافر المتبادل. وتنشأ نتيجة لذلك قوة استرداد تحاول أن تعيد عناصر الإلكترون إلى مواضع اتزانها. بطريقة أخرى، يُزاح الغلاف الكروى المشحون المتسارع عن مركز مجاله الكهربى الخاص، فيُرى المجال مشوّشًا. لا يمكن أن يكون الغلاف دائما عند مركز المجال لأنه لا يستطيع أن يجعل مجاله أسرع من مقدار سرعة الضوء. ويسفر التآثر بين الغلاف المشحون ومجاله الخاص المشوّش عن قوة ذاتية تحاول استرداد المجال إلى شكله العادى (غير المتسارع). لهذا فإنه بمقاومة التشوه الحادث لمجال الإلكترون تقاوم القوة الذاتية تسارع الإلكترون.

يظل التبرير نفسه قائما بالنسبة لإلكترون نقطى أيضا، حيث يُزاح عن مركز مجاله الكهربى ويُرى مجاله مشوّشًا نتيجة لذلك. ويسفر تآثر الإلكترون مع مجاله الخاص المشوش عن قوة ذاتية تقاوم تشوّه المجال. هذا يعنى أن القوة الذاتية تقاوم الإلكترون المتسارع. وكما سنرى أدناه، القوة الذاتية لكل من الإلكترون الكلاسيكى والنقطى تأخذ شكل القوة القصورية – فهى تتناسب مع التسارع، ومعامل التناسب هى الكتلة المناظرة لطاقة المجال الكهربى للإلكترون من خلال المعادلة $E = mc^2$. وفى حالة التآثرات الكهرومغناطيسية تكون تلك الكتلة كهرومغناطيسية الأصل. وإذا اعتبرنا الجسيمات الأولية التى تشارك فى تآثرات أخرى نقطية، فإنه من الثابت أن نفس الآلية الموضحة أعلاه بإيجاز تكون باعثًا على إسهامات من تآثرات أخرى للإجهاد رباعى الأبعاد والقوة الاستردادية المنبثقة فى الأنبوب الكونى المشوه لجسم لاقصورى. وبذلك يمكن اعتبار المقاومة التى يبديها جسم ما

لتسارعه (أى قصوره الذاتى) على أنها نتيجة لتآثرات كهرمغناطيسية وضعيفة وقوية فى إطار *النموذج المعيارى* (الذى لا يتضمن التآثر الثقالى). وبما أن الكتلة هى مقياس تلك المقاومة فإنه يجب اعتبارها أيضا من حيث المنشأ كهرومغناطيسية وضعيفة وقوية.

والآن، قبل أن تبدأ دراستنا للإلكترون الكلاسيكى، دعنا نطرح سؤالا يفرض نفسه طبيعيا نتيجة لمناقشة آلية القصور الذاتى والكتلة. ذلك أن الإلكترون مثلا لايزاح فقط عن موضع اتزانه عند مركز مجاله الخاص عندما يتسارع. إذا تحرك الإلكترون بسرعة ثابتة بالنسبة لمراقب قصورى I فإنه سوف ينحرف باستمرار عن مركز مجاله الكهربى الخاص كما يراه I. وطبقا لمبدأ النسبية، يكون الإلكترون دائما عند مركز مجاله فى إطاره الساكن، ولهذا فإنه لا يكون معرضا لأي قوة محصلة. وبما أن الإلكترون غير متسارع فإنه لا يتعرض لأية قوة حسبما يراه المراقب I أيضا. لكن حقيقة أن الإلكترون يزاح عن موضع اتزانه كما يحدده I يجب أن يكون لها معنى ما فيزيائى. إذا بدأ الالكترون فى التسارع فإن المراقب القصورى I سوف يجد أن الإزاحة عن مركز مجالة ستكون أكبر مما إذا حُددت فى إطار الإلكترون القصورى المتحرك بالتلازم. سوف يفَسَّر هذا ليعنى أن الإلكترون يُبدى مقاومة أكبر لتسارعه كما يحدده I. ولهذا فإنى سأجد أن كتلة الإلكترون، باعتبارها مقياسا لتلك المقاومة، سوف تكون *أكبر*. ومن ثم فإن الزيادة النسبوية فى الكتلة تتبع أيضا، على ما يبدو، الآلية المسئولة عن قصور الإلكترون الذاتي وكتلته. وفى حقيقة الأمر، عندما تُحسب كمية تحرك المجال الكهربى لشحنة تتحرك بمقدار سرعة ثابت بالنسبة للمراقب I، فإن الكتلة المناظرة لطاقة مجال الشحنة تزداد بزيادة مقدار سرعته [١١٥، ص 3-28].

٩,٣ الكتلة الكهرومغناطيسية والقصور الذاتى للإلكترون الكلاسيكى

فى عام ١٨٨١ تحقق طومسون [١٢٥] من أن جسيمًا مشحونًا كان أكثر مقاومة لأن يتسارع من جسيم آخر مماثل ومتعادل. وبهذا يكون قد أدرك بالحدس أن القصور الذاتى يمكن إحالته إلى ظاهرة الكهرومغناطيسية. ولقد تطور هذا الحدس بصورة رئيسية بفضل أبحاث هيفيساید [١٢٦]، سيرل [١٢٧]، أبراهام [١٢٨]، لورنتز [١٣، ١٢٩]، بوانكاريه [١٣٢، ١٣١]. فيرمى [١٣٣٥، ١٣٤، ١١٢،١٣٣]، ماندل [١٣٦]، ويلسون [١٣٧]، برايس [١٣٨]، كوال [١٣٩] وروهيلتش [١١٨، ١٤٠]، وذلك فى إطار نظرية الإلكترون الكلاسيكى، إلى ما يعرف الآن بنظرية الكتلة الكهرمغناطيسية الكلاسيكية للإلكترون. فى هذه النظرية يعتبر القصور الذاتى ظاهرة محلية (موضعية)(*) ناشئة عن تآثر الإلكترون مع مجاله الكهرمغناطيسى الخاص.(**)

لاتزال نظرية الكتلة الكهرمغناطيسية للقصور الذاتى هى النظرية الوحيدة التى تتنبأ بالحقيقة التجريدية التى تفيد بأن هناك جزءًا على الأقل كهرمغناطيسى المنشأ من القصور الذاتى والكتلة القصورية لكل جسيم مشحون. وطبقا لصياغة فينمان [١١٥]: "هناك إثبات تجريبى محدد لوجود قصور ذاتي كهرمغناطيسي – هناك دليل على أن بعضًا من كتلة الجسيمات المشحونة كهرومغناطيسى المنشأ". وعلى الرغم من الحقيقة التى تفيد بأن

(*) فى المقابل، أوضح ماخ [١٤٤] حوالى عام ١٨٨٣ أن القصور الذاتى كان يعزى إلى كل المادة الموجودة فى الكون، وهذا بفرض أن الخاصية المحلية للقصور الذاتى لم يكن لها سبب غير محلّى. لكن النسبية العامة تقضى بأن الدور الوحيد لكل المادة الكونية يتمثل فى تحديد انحناء الزمكان، ومن ثم تحديد أى من الخطوط الكونية تكون جيوديسية.

(**) لمعرفة المزيد عن التطور التاريخى لنظرية الكتلة الكهرومغناطيسية الكلاسيكية، انظر [١١٨، ١٤١، ١٤٢، ١٤٣]. انظر أيضا ملحق C فى آخر هذا الكتاب.

فيزيائين كثيرين فى بداية القرن العشرين اعترفوا بالأهمية البالغة التى حظى بها مفهوم الكتلة الكهرومغناطيسية فى علم الفيزياء عمومًا لأنه 'أساس النظرية الكهرومغناطيسية للمادة' [١٣٤]، إلا أنه يصعب تفسير التخلى عنه بعد ظهورالنسبية وميكانيكا الكم. وقد حدث ذلك على الرغم من أن نظرية الإلكترون الكلاسيكية تنبأت قبل نظرية النسبية بما يفيد أن الكهرومغناطيسية تزداد بزيادة السرعة، مانحة بذلك الاعتماد الصحيح للسرعة، وأن العلاقة(*) بين الطاقة والكتلة هى $E=mc^2$ [١١٥، ص ص 3-28، 4-28]. فى الوقت الحاضر [١٤٥، ص ٢١٣] "تذكّرنا حالة النظرية الكلاسيكية للإلكترون بمنزل تحت الإنشاء هجره العاملون فيه بمجرد أن تلقوا أخبارًا عن بلاء قادم عما قريب. البلاء فى هذه الحالة، بالطبع، كان نظرية الكم. ونتيجة لذلك، تبقى هناك فى نظرية الإلكترون الكلاسيكية أسئلة مهمة عديدة لم تُحلّ كليا أو جزئيا".

غالبا ما يكون رد الفعل الأول لأى دراسة خاصة بالنموذج الكلاسيكى للإلكترون هو السؤال عن سبب دراسته أساسًا طالما اتضح أن هذا النموذج خاطئ. نصف قطر الإلكترون الكلاسيكى الذى يعطى كتلة الإلكترون الصحيحة فى حدود $10^{-15}m$، بينما وجد من التجارب التى تختبر خصائص تشتت الإلكترون أن حجمه أصغر من $10^{-18}m$ [١٤٦]. لسوء الحظ (أو لحُسْنه) لم يكن ذلك بالأمر البسيط. قام "ماك جريجور" [١٤٧] بتحليل السبب فى أن الإلكترون لا يبدو أنه بالغ الصغر، لكن ما يوضح على الفور أن تجارب التشتت لا تحكى القصة بأكملها هو الحقيقة التى تقضى بأن هذه التجارب متعلقة فقط بالجانب الجسيمى للإلكترون.

(*) فى حقيقة الأمر، وجد أن العلاقة بين الكتلة والطاقة تحتوي على معامل ٤/٣ تم أخذه فى الاعتبار مؤخرا؛ انظر [١١٥، ص ٢٨-٤].

على الرغم من أن جميع الدراسات قد كرست خصيصا لطبيعة الإلكترون (انظر على سبيل المثال [١٤٨، ١٤٩])، إلا أن أحدًا لا يعرف الهيئة التى يبدو عليها إلكترون ما قبل اكتشافه، بل إن البعض ينكر جوهر صحة مثل هذا السؤال. لكن الشيء الوحيد الواضح تماما هو أن الحد التجريبى الأعلى لحجم الإلكترون ($<10^{-18}m$) لا يمكن تفسيره ليعنى أن الإلكترون عبارة عن جسيم (متموضع فى منطقة حجمها أصغر من $10^{-18}m$) دون أن يناقض كلا من ميكانيكا الكم والإثبات التجريبى الموجود فعلا. (تذكر مناقشتنا لعزم ثنائى القطب لذرة الهيدروجين فى الفصل العاشر). ولهذا فإن تجارب التشتت لا تنبئ إلا بالقليل جدا عن ماهية الإلكترون بالفعل، وهناك حاجة إلى مزيد من الدراسات المعينة على الفهم. لهذا السبب لايمكن اعتبار هذه التجارب دليلا ضد أى دراسة خاصة بالنموذج الكلاسيكى للإلكترون.

ولما كانت خاصية استقرار الإلكترون الكلاسيكى تمثل إحدى مسائله البالغة الصعوبة (وهى ما تُبقى على شحنته معه)، فإن المرء يمكنه استخلاص أن الغرض الأساسى فى النموذج الكلاسسيكى للإلكترون – وهو وجود تآثر بين عناصر شحنته من خلال مجالاته المشوّشة – يمكن أن يكون خاطئا. لكن الوجود المؤكد لقوة التفاعل الإشعاعى قد تعنى فى حقيقة الأمر أن هناك تآثرًا (تنافرًا) بين الأجزاء "المختلفة لشحنة الإلكترون [١١٣، ص ٤٣٩]: " يعزى التفاعل الإشعاعى إلى تأثير قوة الشحنة على نفسها – أو، بعبارة أكثر دقة وتفصيلا، صافى القوة التى تبذلها المجالات المتولدة من الأجزاء المختلفة لتوزيع الشحنة التى تؤثر على بعضها بعضًا". وفى حالة إلكترون مشع مفرد يكون وجود قوة تفاعل إشعاعى باعثًا – فيما يبدو – على اقتراح وجود تآثر بين 'أجزاء' مختلفة من الإلكترون.

لن نتبع هنا المقاربة العيارية لحساب القوة الذاتية [١١٣، ١١٤، ١١٧، ١٥٠] التى تصف حركة متسارعة لإلكترون ما فى إطار قصورى I. وبدلا من ذلك، سوف تجرى جميع الحسابات فى إطار إسناد لاقصورى N^a يكون فيه الإلكترون المتسارع ساكنا. وسبب ذلك أن حساب المجال الكهربى والقوة الذاتية لإلكترون متسارع فى الإطار المتسارع N^a (وليس فى I) يكون ضروريا للتطبيق الصحيح لمبدأ التكافؤ، لأنه يربط بين هاتين الكميتين للإلكترون فى إطار (متسارع) لاقصورى N^a وإطار لاقصورى N^g معلق فى مجال ثقالى (جاذبى). وتكمن ميزة حساب المجال الكهربى للإلكترون فى إطار لاقصورى يكون فيه الإلكترون ساكنا فى أنه لا يمكن الحصول عليه إلا من جهد قياسى ولا تشمل الحسابات على أزمنة تأخُّر، كما رأينا فى الفصل الثامن.

باعتبار عنصر الحجم اللامتماثل اتجاهيًا (٨,١٧)،

$$dV^a = dV\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right). \qquad (9.5)$$

يكون لدينا، بالنسبة للجهد القياسى لعنصر حجمى مشحون $-\rho dV^a$ من الإلكترون الساكن في N^a،

$$d\varphi^a = -\frac{\rho}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right)dV. \qquad (9.6)$$

باستخدام الجهد القياسى (٩,٦) فقط، نحصل على المجال الكهربى للعنصر الحجمى المشحون $-\rho dV^a$ الساكن فى N^a على الصورة

$$d\mathbf{E}^a = -\nabla d\varphi^a = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\rho dV.$$

وعندئذ يكون المجال الكهربى للإلكترون:

$$\mathbf{E}^{\mathrm{a}} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\rho\,\mathrm{d}V\,. \qquad (9.7)$$

وتكون القوة الذاتية التى يبذلها الإلكترون على عنصر $-\rho dV_1^a$ من شحنته هى:

$$\mathrm{d}\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = -\rho\,\mathrm{d}V_1^{\mathrm{a}}\mathbf{E}^{\mathrm{a}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\rho^2\,\mathrm{d}V\,\mathrm{d}V_1^{\mathrm{a}}\,. \qquad (9.8)$$

وتكون القوة الذاتية المحصلة المؤثرة على الإلكترون ككل هى:

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\rho^2\,\mathrm{d}V\,\mathrm{d}V_1^{\mathrm{a}}\,. \qquad (9.9)$$

وبعد اعتبار العنصر الحجمى اللامتماثل اتجاهيا (٩,٥) تصبح:

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right)\rho^2\,\mathrm{d}V\,\mathrm{d}V_1\,.$$

بفرض توزيع متماثل كرويا لشحنة الإلكترون [١٣٠]، واتباع الخطوات المثالية لحساب القوة الذاتية [١٥٠] نحصل على (انظر الملحق D):

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = -\frac{U}{c^2}\mathbf{a}\,. \qquad (9.10)$$

حيث

$$U = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\int\int\frac{\rho^2}{r}\mathrm{d}V\,\mathrm{d}V_1$$

هى طاقة المجال الكهربى للإلكترون.

بما أن U/c^2 هى الكتلة المناظرة لتلك الطاقة، فإنه يمكننا كتابة المعادلة (٩,١٠) على الصورة:

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = -m^{\mathrm{a}}\mathbf{a}\,. \qquad (9.11)$$

حيث تعرف $m^{a} = U/c^2$ بأنها الكتلة الكهرومغناطيسية القصورية للإلكترون. المعامل الشهير ٤/٣ لكتلة الإلكترون الكهرومغناطيسية لم يظهر فى المعادلة (٩,١١)، والسبب هو أننا، فى المعادلتين (٩,٨) و (٩,٩) قد عرّفنا واستخدمنا العنصر الحجمى الصحيح $\mathrm{d}V_{\mathrm{l}}^{a} = (1+\mathbf{a}\bar{\mathbf{r}}/2c^2)\mathrm{d}V_{\mathrm{l}}$ الناشئ من سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيا فى N^{a}؛ وبدون أخذه فى الاعتبار ينتج عنه ظهور المعامل ٤/٣.

القوة الذاتية $\mathbf{F}^{a}_{\mathrm{self}}$ التى تعرّض لها إلكترون نتيجة لمجاله الخاص المشوّش تعمل فى عكس اتجاه **a**، ولهذا فإنها تقاوم تسارع الإلكترون. هذه القوة كما يتضح من المعادلة (٩,١٠) كهرمغناطيسية المنشأ تماما، ومن ثم يكون أيضا كل من المقاومة التى يبديها الإلكترون الكلاسيكى لكى يتسارع (أى قصوره الذاتى) وكتلته القصورية (كمقياس للمقاومة) كهرومغناطيسية المنشأ تماما.

القوة الذاتية (٩,١١) تسمى عادة القوة القصورية. وطبقا لقانون نيوتن الثالث، فإن القوة الخارجية **F** التى تسرّع الإلكترون والقوة الذاتية $\mathbf{F}^{a}_{\mathrm{self}}$ التى تقاوم **F** لهما مقداران متساويان واتجاهان متعاكسان: $\mathbf{F} = \mathbf{F}^{a}_{\mathrm{self}}$. وبذلك نستطيع أن نكتب المعادلة $\mathbf{F}=m^{a}\mathbf{a}$ التى تعنى أن قانون نيوتن الثانى يمكن استنتاجه على أساس كهرديناميكا ماكسويل المُطبّقة على النموذج الكلاسيكى للإلكترون وقانون نيوتن الثالث.

فى الفصل الثامن حسبْنا المجال الكهربى لشحنه تسقط فى N^a بتسارع ظاهرى $\mathbf{a}^* = -\mathbf{a}$ (حيث $\mathbf{a}$التسارع الحقيقى للإطار N^a)، ووجدنا عند كل لحظة أنه مجال كولوم. توضح هذه النتيجة أنه بالنسبة لمراقب لاقصورى ساكن فى N^a لا يكون المجال الكهربى اللحظى لإلكترون ساقط مشوّشا، وهذا بدوره يوضح أنه لا توجد قوة ذاتية تؤثر على الإلكترون. وبناء عليه، فإن حسابنا للقوة الذاتية، التى تبين أن الإلكترون الكلاسيكى يكون معرَّضا لقوة ذاتية فقط عندما يكون مجاله مشوّشا، يؤكد نتيجة الفصل الثامن التى تفيد بأن شكل المجال الكهربى لإلكترون قصورى يكون مطلقا – كل من المراقب القصورى I الساقط مع الإلكترون والمراقب غير القصورى الساكن فى N^a يكتشف مجالا كولوميًا للإلكترون الساقط. عموما:

- يكون مجال كولوم مصحوبا بإلكترون قصورى (يمثله خط كونى جيوديسى) عن طريق مراقب قصورى I (متحرك مع الإلكترون) ومراقب لاقصورى N^a،
- بالنسبة لكل من I و N^a يكون المجال الكهربى لإلكترون لاقصورى (خطه الكونى غير جيوديسي) مشوّشا بالتساوى.
- وكما توقعنا فإن حقيقة أن حالة حركة شحنة (قصورية أو متسارعة) تكون مطلقة تعنى أن شكل المجال الكهربى لشحنة (قصورية أو متسارعة) يكون مطلقا أيضا (كما هو الحال بالنسبة لمراقب قصورى ولاقصورى).

بالمثل لحالة حساب الجهد الكهربى فى N^a، فإن سرعة الضوء المتوسطة واللامتماثلة اتجاهيا (٧,١٤) فى N^a تؤدى أيضا إلى r^g و dV^g لامتماثلين اتجاهيا فى N^g، كما رأينا فى الفصل الثامن:

$$(r^g)^{-1} \approx r^{-1}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right)$$

و

$$dV^g = dV\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right). \qquad (9.12)$$

ونتيجة لذلك يكون الجهد القياسى لعنصر حجمى مشحون $-\rho dV^g$ بالنسبة للإلكترون الموجود فى N^g هو

$$d\varphi^g = -\frac{\rho}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right)dV. \qquad (9.13)$$

نذكّر بأنه بمجرد أن يؤخذ العنصر الحجمى اللامتماثل اتجاهيا dV^g فىّ الاعتبار نستطيع الحصول على الجهد الصحيح (٩,١٣) لشحنة معلقة فى مجال ثقالى

يتم إجراء حساب المجال الكهربى لعنصر حجمى مشحون $-\rho dV^g$ فى N^g مرة ثانية فقط باستخدام الجهد القياسى (٩,١٣):

$$d\mathbf{E}^g = -\nabla d\varphi^g = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} + \frac{\mathbf{g}}{c^2 r}\right)\rho dV.$$

ومن ثم يكون مجال الإلكترون على الصورة:

$$\mathbf{E}^g = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} + \frac{\mathbf{g}}{c^2 r}\right)\rho dV. \qquad (9.14)$$

بمقارنة المجال الكهربي لإلكترون معلق في مجال جاذبية الأرض (٩,١٤)، محدد في N^g، مع المجال الكهربي لإلكترون متسارع (٩,٧)، محدد في الإطار N^a، يتضح أن المجال الكهربي لإلكترون ساكن على سطح الأرض وإلكترون ساكن في الإطار N^a الذي يتحرك بعجلة $\mathbf{a} = -\mathbf{g}$ يكونان مشوهين طبقًا لمبدأ التكافؤ. بالتعويض $\mathbf{a} = -\mathbf{g}$ في معادلة الجهد الكهربي (٩,٦) تتحول أيضًا إلى (٩,١٣)، كمال يتطلبه مبدأ التكافؤ.

القوة الذاتية التي يتأثر بها مجال الإلكترون مع عنصر $-\rho dV_1^g$ من شحنة الإلكترون تكون حينئذ.

$$d\mathbf{F}_{self}^{g} = -\rho dV_1^g \mathbf{E}^g = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} + \frac{\mathbf{g}}{c^2 r}\right)\rho^2 dV dV_1^g . \qquad (9.15)$$

وتكون القوة الذاتية الناتجة التى يؤثر بها الإلكترون على نفسه هي:

$$\mathbf{F}_{self}^{g} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2} - \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n} + \frac{\mathbf{g}}{c^2 r}\right)\rho^2 dV dV_1^g . \qquad (9.16)$$

وبعد اعتبار الشكل الصريح (٩,١٢) للعنصر $-\rho dV_1^g$، بافتراض توزيع متماثل كرويًا لشحنة الإلكترون، وحساب القوة الذاتية على غرار ما فعلنا في حالة إلكترون ساكن في N^a، نحصل على:

$$\mathbf{F}_{self}^{g} = \frac{U}{c^2}\mathbf{g} . \qquad (9.17)$$

حيث

$$U = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\int\int\frac{\rho^2}{r}dV dV_1$$

هي طاقة مجال الإلكترون، وبما أن U/c^2 هي الكتلة المصاحبة لطاقة مجال الإلكترون، أي كتلته الكهرومغناطيسية، فإن المعادلة (9.17) تأخذ الصورة:

$$\mathbf{F}_{self}^{g} = m^g \mathbf{g} . \qquad (9.18)$$

حيث $m^g = U/c^2$ هي الكتلة المعرفة هنا بكتلة الإلكترون الثقالية المطاوعة. وكما في حالة القوة الذاتية المؤثرة على إلكترون متسارع في N^a، فإن المعامل 4/3 في الكتلة الكهرومغناطيسية لا يظهر في (9.18) السبب نفسه:

استُخدم العنصر الحجمي الصحيح في (9.16) وبناء عليه فإن العنصر الحجمي اللامتماثل اتجاهيًا dV^g يحل *آنيًا* مشكلتين مختلفتين – يحذف كلاً من المعامل 1/2 في معادلة الجهد (8.1) التي استنتجها فيرمي، كما رأينا في الفصل الثامن، والمعامل 4/3 في معادلة القوة الذاتية.

القوة الذاتية $\mathbf{F} = \mathbf{F}^g_{self}$ المؤثرة على إلكترون ما على حساب مجاله الخاص المشوّش تتجه بموازاة g وتقاوم تشوه مجاله الكهربي استنادًا إلى حقيقة أن الإلكترون الساكن على سطح الأرض يكون ممنوعًا من السقوط. هذه القوة تسمى عادة القوة الثاقلية. وكما رأينا تنشأ $\mathbf{F}^g_{self}$ فقط عندما يمنع إلكترون من السقوط، أي فقط عندما ينحرف عن مساره الجيوديسي. وبما أن مجال كولوم يكون مصحوبًا بإلكترون متحرك بلا مقاومة (يمثله خط كوني جيوديسي)، فإن القوة الذاتية $\mathbf{F} = \mathbf{F}^g_{self}$ تكون في حقيقة الأمر بالتبعية قوة لاقصورية، لأنها تقاوم انحراف الإلكترون عن مساره الجيودسي، أي أن $\mathbf{F} = \mathbf{F}^g_{self}$ تقاوم انحراف الإلكترون عن حركته بالقصور الذاتي.

بناء على ذلك، تكون القوة المؤثرة على الإلكترون الكلاسيكي الساكن في مجال ثقالي ذات طبيعة قصورية، وتكون كهرمغناطيسية المنشأ تمامًا، كما هو واضح من المعادلة (٩,١٨)، مما يعني أن كتلة الإلكترون الثقالية المطاوعة m^g في $\mathbf{F}^g_{self} = m^g\mathbf{g}$ تكون أيضًا كهرمغناطيسية المنشأ تمامًا. ويتضح من هذا على الفور السبب في تساوي الكتلتين، القصورية والثقالية المطاوعة، للإلكترون الكلاسيكي.

وبما أن القوة الذاتية $\mathbf{F} = \mathbf{F}^g_{self}$ ذات طبيعة قصورية، فإن ما يسمى عادة بالكتلة الثقالية المطاوعة تكون بالتبعية في حقيقة الأمر كتلة قصورية. ويصبح هذا مبرهناً عليه من حقيقة أن كلتا الكتلتين مقياس للمقاومة التي يبديها إلكترون ما عندما ينحرف عن مساره الجيوديسي. في زمكان مسطح، تكون قوة المقاومة هي $\mathbf{F}^a_{self} = -m^a\mathbf{a}$، بينما في زمكان منحنٍ تكون نفس

القوة نفسها التي تقاوم انحراف الإلكترون عن مساره الجيوديسي هي $\mathbf{F}^{g}_{self} = -m^{g}\mathbf{g}$، حيث m^{a}، m^{g} هما مقياسا المقاومة (القصور الذاتي) في كلتا الحالتين. وتكون قوتا المقاومة متساويين $\mathbf{F}^{g}_{self} = \mathbf{F}^{a}_{self}$ للحالة $\mathbf{a} = \mathbf{g}$ كما هو واضح من المعادلتين (٩,١٠) و(٩,١٧)، ومن ثم يكون $m^{g}=m^{a}$. هذا التكافؤ ينتج أيضًا من حقيقة أن m^{a}، m^{g} هما الشيء نفسه – الكتلة المصاحبة لطاقة مجال الإلكترون.

النتيجة التي تقتضي بأن القوة $\mathbf{F}^{g}_{self}$ المؤثرة على إلكترون ما عندما ينحرف عن مساره الجيوديسي بسبب كونه ساكنًا في مجال ثقالي هي قوة قصورية لا تكون محققة بالنسبة للإلكترون الكلاسيكي فقط. فالحركة بلا مقاومة (أي الحركة بالقصور الذاتي) لجسم ما في كل من النسبية الخاصة (زمكان مسطح)، والنسبية العامة (زمكان منحن)، تمثل بخط كوني جيوديسي، بينما يتعرض جسم ما ممثل بخط كوني لاجيوديسي لقوة مقاومة معاكسة للقوة الخارجية التي تمنع الجسم من اتباع مساره الجيوديسي في الزمكان. هذا هو السبب في أن قوة المقاومة قصورية المنشأ في كل من النسبية الخاصة والعامة. لاحظ أن النتيجة النهائية الخاصة بالطبيعة اللاثقالية للقوة المؤثرة على جسم ما ساكن في مجال ثقالي تستخلص من النسبية العامة ذاتها– طالما أن الجسم المعلق في مجال ثقالي ينحرف عن مساره الجيوديسي، مما يعني أنه ممنوع من الحركة بلا مقاومة (بالقصور الذاتي)، فإنه يتعرض لقوة قصورية تنشأ فقط عندما يمنع الجسم من الحركة بالنمط نفسه غير المقاوم (القصوري).

طبقًا للنسبية العامة، يكون الخط الكوني لإلكترون ساقط في مجال ثقالي جيوديسيًا. هذا يعني أن الإلكترون يتحرك بالقصور الذاتي (بدون مقاومة) ومجاله الكولومي لا يكون مشوشًا بالنسبة لمراقب قصوري I ساقط مع الإلكترون، ويجب ألا يكون مشوشًا بالنسبة لمراقب في N^{g} أيضًا. لقد

رأينا في الفصل الثامن أن هذا هو الحال في واقع الأمر – في أي لحظة، لا يكون مجال الإلكترون الساقط مشوّشًا في N^g، مما يعني في ضوء نتائج الفصل الحالي أنه غير معرض لقوة ذاتية، أي أن الإلكترون لا يبدي مقاومة لحركته المتسارعة في N^g. وهذا يثبت صحة النتيجة المستخلصة في الفصل الثامن عن السبب في أن الإلكترون يسقط من *تلقاء ذاته* في مجال ثقالي، بينما لا توجد قوة خارجية تسبب تسارعه– الطريقة الوحيدة لأن يعوض الإلكترون اللاتماثل الاتجاهي في انتشار الضوء، ولأن يحفظ الشكل الكولومي لمجاله الكهربي، هي أن يسقط بعجلة (تسارع) g. إذا منع الإلكترون من السقوط، فإن مجاله الكهربي يشوّش وتظهر القوة الذاتية (٩,١٨) وتحاول أن تدفع الإلكترون إلى الحركة (السقوط) بالطريقة التي يسترد بها مجاله الكولومي، وعندما يزال التشويش الحادث لمجال الإلكترون تختفي القوة الذاتية.

النتيجة التي تفيد بأن الإلكترون الكلاسيكي يسقط من تلقاء ذاته في مجال ثقالي بتسارع g لكي يمنع مجاله من أن يكون مشوّشًا هي نتيجة صحيحة بالنسبة لأي شحنة كهربية، فضلاً عن أنها صحيحة بالنسبة للشحنات الضعيفة والقوية. اعتبر شحنات شبه نقطية كهربية، وضعيفة وقوية، معلقة في مجال ثقالي، يؤدي الانتشار اللامتماثل اتجاهيًا للتأثرات الثلاثة في المجال الثقالي إلى أن مجالات شحناتها تكون مشوّشة، أي أن الشحنات لا تكون إلى حد ما عند مواضع اتزانها في مركز مجالاتها. ونتيجة لذلك تظهر قوة ذاتية تحاول أن تحرك الشحنات إلى مواضع اتزانها. وإذا تركت الشحنات حرة فإن القوة الذاتية سوف تعمل على تسارعها بعجلة g، لأنه في هذه الحالة فقط يتعادل اللاتماثل في انتشار التأثرات الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية، بحيث ترى الشحنات مجالاتها غير مشوهة. هذه الآلية تلقى مزيدًا من الضوء على حقيقتين هما:

• في النسبية العامة، تعتبر حركة جسيم يسقط نحو مركز جاذب كأنها حركة قصورية (بلا مقاومة) وتمثل بخط كوني جيوديسي.

• كحقيقة تجريبية، تسقط جميع الأجسام في مجال ثقالي بالتسارع نفسه.

والآن نحن بصدد تلخيص العلاقة بين حركة الإلكترون الكلاسيكي وشكل مجاله:

• حالة إلكترون متحرك بسرعة ثابتة في نطاق زمكاني مسطح، حيث تكون سرعة الضوء المتوسطة المتماثلة اتجاهيًا غير مقاومة لحركته المنتظمة لأن الحركة المنتظمة الممثلة بخط كوني مستقيم في زمكان مسطح تؤكد أن المجال الكهربي للإلكترون مجال كولومي. بصياغة أخرى: الطريقة الوحيدة لأن يمنع إلكترون ما مجاله الكهربي من التشوه في زمكان مسطح هي أن يتحرك بسرعة ثابتة.

• حالة إلكترون يقاوم تسارعه في زمكان مسطح لأن الحركة المتسارعة تشوش المجال الكهربي للإلكترون، وهذا يسفر عن قوة ذاتية كهربية تعاكس تشوه مجال الإلكترون.

• حالة إلكترون ساقط نحو سطح الأرض لا يقاوم تسارعه (الزمكاني المسطح) لأنه، كما رأينا، عن طريق السقوط بتسارع g يعوض الإلكترون اللاتماثل في انتشار الضوء بالقرب من الأرض ويمنع مجاله الكهربي من أن يصبح مشوشًا (التسارع الزمكاني المنحني للإلكترون الساقط يساوي صفرًا).

• حالة إلكترون ساكن على سطح الأرض معرض لقوة ذاتية كهربية تحاول إسقاط الإلكترون لأن سرعة الضوء المتوسطة اللامتماثلة اتجاهيًا في المجال الثقالي للأرض تشوش مجال الإلكترون، وهذا بدوره يسبب القوة الذاتية. تلك القوة ذات طبيعة قصورية (لا ثقالية)، كما أنها كهرومغناطيسية المنشأ.

إن الآلية المسببة للسقوط الحر (غير المقاوم) للإلكترون في مجال ثقالي وللقوة الذاتية (٩,١٨) التي تقاوم منعه من السقوط مطابقة للآلية المسئولة عن القوة الذاتية (٩,١٠) التي يتعرض لها إلكترون متسارع في زمكان مسطح وعن سقوطه الحر كما وُصِف في الإطار المتسارع N^a. هذه الآلية تعني ضمناً أن اللاتماثلية المتطابقة في انتشار الضوء في N^a وN^g تسبب ظواهر متشابهة تتحول تعبرياتها الرياضية إلى أخرى عندما يستخدم التعويض **a=-g**. وكما رأينا في القسم ٧,٤، تنشأ اللاتماثلية المتطابقة في انتشار الضوء في N^a وN^g من حقيقة أن الخطوط الكونية للأجسام الساكنة في N^a وفيN^g تنحرف بالتساوي عن أشكالها الجيوديسية. ويبدو أن مبدأ التكافؤ نفسه ينبثق من هذه الحقيقة لأنه يسبب الانتشار اللامتماثل اتجاهيًا للضوء في N^a وN^g، مما يؤدي بدوره إلى ظواهر كهرمغناطيسية *متطابقة* في N^a وN^g. لقد رأينا في قسم ٧,٤ أن انتشار التآثرات الضعيفة والقوية لا متماثل أيضًا في N^a وN^g. هذا اللاتماثل اتجاهيًا يسبب هناك أيضًا حدوث ظواهر ضعيفة وقوية متطابقة.

رأينا أن الكتلتين القصورية والثقالية المطاوعة للإلكترون الكلاسيكي تكون كهرومغناطيسية المنشأ كليةً. وبما أن الكتل الثلاث جميعها – القصورية، والثقالية المطاوعة والثقالية الفعالة – تعتبر متساوية(*)، فإنه ينتج

(*) يمكن توضيح تكافؤ الكتلتين الثقاليتين، الفعالة والمطاوعة على النحو التالي: اعتبر جسيمًا على سطح الأرض. القوة الثقالية المؤثرة على الجسيم تعطى بقانون نيوتن الثاني F= mg، حيث m هي كتلته الثقالية المطاوعة. القوة نفسها يمكن كتابتها بدلالة القانون الثقالي لنيوتن $F = GMm/r^2$ حيث G هو ثابت الثقالة (الجاذبية)، r نصف قطر الأرض، m و M هما الكتلتان الثقاليتان الفعالتان للجسيم والأرض على الترتيب. لكن هذه المعادلة يمكن كتابتها على الصورة $F = GMm/r^2 = mg$، حيث تؤدي الكتلة m دور الكتلة الثقالية المطاوعة.

أن تكون الكتلة الثقالية الفعالة للإلكترون الكلاسيكي كهرمغناطيسة المنشأ ايضًا. وبما أن شحنة الإلكترون الكلاسيكي هي فقط التي تمثله (لا توجد كتلة ميكانيكية)، فإن الكتلة الثقالية الفعالة للإلكترون تكون بالتبعية ممثلة بشحنته. لهذا فإن شحنة الإلكترون هي التي تشوه الزمكان وتسبب السرعة اللامتماثلة المتوسطة للضوء بجوار الإلكترون.

ولما كانت اللاتماثلية في سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة ونظرية الكتلة الكهرمغناطيسية هما اللتان تشرحان باتساق تام سقوط الإلكترون الكلاسيكي نحو الأرض والقوة الذاتية المؤثرة على إلكترون ساكن على سطح الأرض، فإنه يبدو طبيعيًا أن نتوقع تفسير التجاذب الثقالي بين إلكترونين بالطريقة نفسها.

بالإضافة إلى التنافر الكهربي بين الكترونين (e_1 وe_2) في الفراغ، فإنهما أيضًا يتجاذبان مع بعضهما من خلال اللاتماثلية في سرعة الضوء الحقيقية المتوسطة التي يسببها كل منهما: e_1 يسقط نحو e_2 ليعادل اللاتماثلية التي يسببها e_1، وليمنع مجاله الكهربي من أن يصبح مشوَّشًا، والعكس بالعكس. بكلمات أخرى، تؤثر شحنة الإلكترونات على انتشار الضوء حولها، مما يغير بدوره شكل خطوط الإلكترون الكونية التي تؤدي إلى تقاربها من بعضها بعضًا. وهكذا، في إطار نظرية الكتلة الكهرمغناطيسية، تكون اللاتماثلية في انتشار الضوء بالقرب من الإلكترونات كافية لشرح تجاذبها (الثقالي) المتبادل بدلالة حركة بلا مقاومة، التي لا تسببها قوة. بمثل هذه الطريقة، كما رأينا أعلاه، يمكن لحالة الإلكترون الكلاسيكي أن توفر تبصرًا أبعد وأعمق في السؤال عن السبب في أن التجاذب الثقالي للأجسام لا يتضمن أي قوة كما وصفته النسبية العامة.

٤-٩ النموذج المعيارى والقصور الذاتي:

دراسة نظرية الكتلة الكهرومغناطيسية الكلاسيكية تجعل من الممكن أن نسأل عما إذا كانت الآلية نفسها التى تفسر القصور الذاتي وكتلة الإلكترون الكلاسيكى – تآثر شحنة الإلكترون مع مجاله الخاص المشوّه – تؤدى أيضا إلى إسهامات في القصور الذاتي والكتلة من التآثرات الأخرى فى إطار نظرية المجال الكمومية (الكوانتية). كما سنرى، النوع نفسه من تأثيرات التآثر الذاتي المعتمد على التسارع يكون أيضًا موجودًا في نظرية المجال الكمومية (الكوانتية) ويبدو أنه يسبب إسهامات من التآثرات الكهرمغنطيسية الضعيفة والقوية في القصور الذاتي والكتلة. وبما أنه لم يكن هناك أي نجاح في تكميم المجال الثقالي، فدعنا نفحص سؤال أصل القصور الذاتي في النموذج المعياري [١٥١]، الذي لا يأخذ في الاعتبار تأثيرات التآثرات الثقالية على سلوك الجسيمات الأولية.

تتحقق جميع التفاعلات في النموذج المعياري من خلال تبادل الكمّات(*) الافتراضية التي تشكل 'المجالات' المصاحبة للجسيمات المتآثرة. على سبيل المثال، في حالة التآثرات الكهرومغنطيسية يُمَثَّل المجال الكهرومغنطيسي الكوانتي لشحنة بسحابة لفوتونات افتراضية تكون مستمرة في الانبعاث والامتصاص بواسطة الشحنة. تنشأ قوى التجاذب والتنافر الكهربية بين شحنتين تتآثران خلال تبادل الفوتونات الافتراضية الناشئة من *الارتدادات* التي تعانيها الشحنات عند انبعاث وامتصاص الفوتونات الافتراضية.

(*) نظرية المجال الكمومية quantum field theory. وتظهر كلمة "كمّ" أو "كمّة" في المؤلفات العربية كمقابل لكلمة quantum لتمييزها عن كلمة "كمية" quantity، وقد آثرنا هنا استخدام كلمات "الكوانتم" و"الكوانتي" و"الكمومي" للتعبير مباشرة عن تعريب كلمات quantum وquantized حسب السياق الذي تظهران فيه، كما استخدمنا كلمة "التكمية" في مقابل quantization [المترجم].

تكون الشحنة الحرة (القصورية) في النموذج المعياري مُعَرِّضة للارتدادات الناتجة من الفوتونات الافتراضية المنبعثة والممتصة، والتي تشكل مجالها الكهربي الخاص. نتيجة للتماثل الكروي، تلغي جميع الارتدادات تمامًا بسبب الفوتونات الافتراضية المنبعثة والممتصة بعضها بعضًا، ولا تكون الشحنة مُعَرِّضة لأي قوة ذاتية. المجال الكهرومغناطيسي الكوانتي لشحنة هو مثيل لمجال غير مشوَش، إذا لم يُنتج التآثر الذاتي للشحنة ومجالها أي قوة ذاتية مؤثرة على الشحنة. من ثم، بدلالة النموذج المعياري، تتحرك شحنة ما بدون مقاومة (بالقصور الذاتي) إذا كانت الارتدادات من الفوتونات الافتراضية المنبعثة والممتصة تلغي بعضها بعضًا تمامًا. بمعنى آخر، كما في حالة الإلكترون الكلاسيكي، أي شحنة مجالها غير مشوش تُمثّل بخط كوني جيوديسي.

وبما أن كمية تحرك الفوتون هي التي تعين الارتداد الذي تشعر به شحنة عند انبعاث أو امتصاص الفوتون، فإن الارتدادات الناتجة من الفوتونات الافتراضية المنبعثة من شحنة لاقصورية تلغي هي الأخرى بعضها بعضًا، لأن جميع الفوتونات، كما يظهر للشحنة، تكون منبعثة بالترددات نفسها (والطاقات)، وبالتالي كميات الحركة نفسها. لكن ترددات الفوتونات الافتراضية القادمة من اتجاهات مختلفة قبل امتصاصها بواسطة شحنة *لاقصورية* تكون معتمدة على الاتجاه (مُزاحة بتأثير النسبية العامة نحو الأزرق أو الأحمر). يشكل اعتماد ترددات الفوتونات الافتراضية الواردة على الاتجاه تشويشًا لمجال شحنة لاقصورية. الآلية المسؤولة عن تشوش المجال هي الآلية الناتجة نفسها من افتراض أن القصور الذاتي ينشأ من إجهاد رباعي الأبعاد يظهر في الأنبوب الكوني المشوّه لشحنة لاقصورية – تُزاح الشحنة من موضع اتزانها عند مركز مجالها الخاص.

لم يُلاحَظ حتى الآن أن الاعتماد الاتجاهي لترددات الفوتونات الافتراضية التي تُمتص بواسطة شحنة لاقصورية يهتز اتزان الارتدادات التي تتعرض لها الشحنة. ويؤدي عدم الاتزان، بدوره، إلى ظهور قوة ذاتية تؤثر على الشحنة اللاقصورية. إن القوة الذاتية الناتجة من عدم الاتزان في الارتدادات التي تسببها الفوتونات الافتراضية المُمتصَة بواسطة شحنة لاقصورية تعتبر قوة مقاومة لأنها تؤثر فقط على شحنات لاقصورية. فهي تظهر فقط عندما تُمنع شحنة قصورية من تتبع خط كوني جيوديسي؛ أي شحنة قصورية نفسها تتبع خطًا كونيًا جيوديسيًا لا تؤثر عليها أي قوة ذاتية. وكما في حالة الإلكترون الكلاسيكي، فإن الخط الكوني لشحنة لاقصورية، الذي يكون مجاله (ذو الكمّات الافتراضية) مشوشًا، لا يكون جيوديسيًا. وكما سنرى بعد قليل، في حالة شحنة متسارعة، يكون للقوة الذاتية المقاومة شكل القوة القصورية التي تقاوم حيود الشحنة عن مسارها الجيوديسي. عندما تكون الشحنة مُعلّقة في مجال ثقالي، تقاوم أيضًا القوة الذاتية التي تأخذ شكل ما تعودنا أن نسميه بالقوة الثقالية، حيود الشحنة عن مسارها الجيوديسي.

واضح أن الشحنات اللاقصورية الضعيفة والقوية (اللونية) سوف تكون هي أيضًا مُعرّضة لقوة ذاتية تظهر من عدم اتزان الارتدادات التي تسببها بوزونات W وZ الممتصة، في حالة التآثرات الضعيفة، والجليونات الممتصة، في حالة التآثرات القوية. لهذا فإن تأثيرات التآثر الذاتي المعتمد على التسارع التي يتعرض لها جسيم لاقصوري في النموذج المعياري تكون مشابهة لتلك الموجودة في النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية، وقد تُعزى لأصل القصور الذاتي والكتلة. وبما أن النموذج المعياري لا يفسر الكتل (والقصور الذاتي) للجسيمات الأولية، فمن المعتقد أن هناك حاجة لتآثر

خامس لتفسير كيفية تكون الكتلة.(*) تبدو آلية التآثر الذاتي المعتمد على التسارع، المعروضة أعلاه، أنها تفسر أصل القصور الذاتي والكتلة في إطار النموذج المعياري دون الحاجة لأي تآثرات إضافية.

الصورة الظاهرة للعيان هي ما يلي. اعتبر جسمًا مكوناته معرضة إلى تآثرات كهرومغناطيسية، وضعيفة، وقوية. إذا كانت الارتدادات من جميع الكمّات الافتراضية (فوتونات، بوزونات W وZ، وجليونات) التي تتوسط التآثرات تلغي تمامًا بعضها بعضًا، فإن الجسم يكون ممثلاً بخط كوني جيوديسي؛ فهو لا يبدي أي مقاومة لحركته، وبالتالي يتحرك بالقصور الذاتي. عندما يكون الجسم متسارعًا، فإن اتزان الارتدادات التي تسببها الكمّات الافتراضية الممتصة يكون مضطربًا، وهذا يؤدي إلى ظهور قوة ذاتية. إن الخط الكوني لجسم مكوناته لها مجالات مشوشة كهرومغناطيسية، وضعيفة، وقوية لا يكون جيوديسيًا. (كما في حالة المجال الكهرومغناطيسي الكمومي، يتجلى تشوش المجالات بذاته في حقيقة أن الارتدادات من الكمّات الافتراضية الممتصة لا تلغي بعضها بعضًا.) يقاوم الجسم نتيجة لذلك تشوه مجالاته الكهرومغناطيسية، والضعيفة، والقوية، وبالتالي يقاوم تسارعه الذي

(*) ما يتوقعه الكثيرون لهذا التآثر الخامس مع القوة الخامسة المصاحبة – والتي يكون إصدارها الأبسط هو قوة هيجز – هو أن يكون له مصيرًا أفضل من القوة الخامسة التي اقترحَت في نهاية الثمانينيات.
في نهايةَ الثمانينيات ظهر بحث جديد أضاف قوة أساسية خامسة إلى القوى الأربع الأصلية، وقيل عن تلك القوة إنها ذات طبيعة تنافرية ضعيفة، وأن مداها الفعال هو بضع مئات من الأمتار، وأن شدتها لا تتوقف على كتلة الجسمين المتفاعلين أو شحنتهما، وإنما على خصيصة تتغير بتغير التركيب الكيميائي، وهي عدد الباريونات Baryons الكلي (أي البروتونات والنيوترونات) في وحدة الكتلة. وقد عمل هذا البحث على زعزعة أفكار كان يُظن أنها ثابتة. راجع في ذلك مقالاً مطولاً عن الأبعاد الخفية للزمكان، مجلة العلوم الأمريكية، الترجمة العربية، عدد ٢ (١٩٨٨م) [المترجم]

يسبب التشوه. إن القوة الذاتية هي قوة مقاومة تتكون من مركبات ثلاث – كهرومغناطيسية، وضعيفة، وقوية. وبالتالي فإنه يبدو أن كلا من القصور الذاتي والكتلة القصورية ينشأ من عدم إلغاء الارتدادات التي تسببها الكمّات الافتراضية الممتصة التي تتوسط التآثرات الكهرمغناطيسية، والضعيفة، والقوية.

إذا كان الجسم ساكنًا في مجال ثقالي، فإن ترددات (أيْ طاقات) الكمّات الافتراضية الممتصة بواسطة الجسيمات المكونة لها تكون مُزاحة بتأثير النسبية العامة (مقارنة بترددات الكمّات الافتراضية الممتصة بواسطة جسيم قصوري). نتيجة لذلك، فإن الارتدادات من الفوتونات، وبوزونات W و Z، والجليونات الافتراضية التي يعانيها كل جسيم من مكونات الجسم لا تلغي بعضها البعض. ذلك اللاإتزان في الارتدادات يؤدي لظهور قوة ذاتية تأخذ، كما سنرى، شكل القوة الثقالية وتتكون أيضًا من مركبات ثلاث – كهرومغناطيسية، وضعيفة، وقوية. هذا يعني أن الكتلة الثقالية المطاوعة، والتي تكون قياسًا للمقاومة التي يبديها الجسم عندما يُمنَع من السقوط في مجال ثقالي، يبدو أنها أيضًا (مثل الكتلة القصورية) تنشأ من اللاإتزان في الارتدادات التي تسببها الكمّات الافتراضية الممتصة التي تتوسط التآثرات الكهرومغناطيسية، والضعيفة، والقوية. وبذلك فإن آلية التآثر الذاتي نفسها المعتمد على التسارع تزودنا بتفسير طبيعي لتكافؤ الكتلتين الثقاليتين القصورية والمطاوعة، ليس فقط في نظرية الإلكترون الكلاسيكية، ولكن في النموذج المعياري أيضًا – هاتان الكتلتان ليستا مجرد متكافئتين؛ فهما الشيء نفسه، نظرًا لأن لهما الأصل نفسه. يتم تعويض اللاتماثل اتجاهيًا في انتشار الكمّات الافتراضية إذا سقط الجسم بتسارع g. إن الارتدادات من جميع الكمّات الافتراضية الممتصة (فوتونات، بوزونات W و Z، وجليونات) التي

يعانيها الجسم الساقط تلغي بعضها بعضًا تمامًا ويتحرك الجسم بلا مقاومة (سالكًا مسارًا جيوديسيًا). في ضوء النموذج المعياري، تقدم هذه الآلية تفسيرًا *شائعًا* للسبب في أن جميع الأجسام تسقط في المجال الثقالي بالتسارع نفسه، والسبب في أنها لا تقاوم سقوطها.

توحي الصورة المختصرة هنا بأن القصور الذاتي والكتلة الثقالية الكاملة القصورية والمطاوعة تنشأ من تأثيرات التآثر الذاتي المعتمد على التسارع في النموذج المعياري – الجسيمات المُشَكِّلة لكل جسم لاقصوري تكون معرضة لقوة ذاتية يسببها اللاإتزان في الارتدادات من الكمّات الممتصة. ما يبدو أنه يفسد الصورة هي كتل السكون لبوزونات W وZ. وبما أن تلك الجسيمات هي حاملات القوة الضعيفة، فإن الارتدادات اللامتّزنة منها تفسر مساهمة التآثر الضعيف في القصور الذاتي والكتلة لكل جسيم يخضع لتآثرات ضعيفة تتدخل فيها البوزونات W وZ. ولكن ما الذي يفسر القصور الذاتي والكتلة لحاملات التآثر الضعيف؟ في الواقع، لا تشكل بوزونات W^+ و W^- مشكلة واقعية لأنها مُعرِّضة لارتدادات الفوتونات الافتراضية بسبب شحنتها الكهربية، وبالتالي قد يتضح أن كتلتها بالكامل تكون في الأصل كهرمغناطيسية. على الرغم من ذلك، فإن أصل القصور الذاتي والكتلة للبوزون Z المتعادل لا يزال لغزًا.

من ناحية، ينتج بالفعل من النموذج المعياري، عند أخذ انزياح التردد بتأثير النسبية العامة في الاعتبار، أن التآثرات الكهرومغناطيسية الضعيفة والقوية تساهم جميعها في القصور الذاتي والكتلة للجسيمات الأولية. من الناحية الأخرى، حقيقة أن البوزون Z المشارك في التوسط في عمليات التآثرات الضعيفة يمتلك كتلة سكون تستلزم أن لا تكون الكتلة كلها مكونة من إسهامات كهرومغناطيسية، وضعيفة، وقوية. من الواضح أن التجربة هي

التي ستحدد في النهاية مقدار الكتلة نتيجة التأثرات الكهرومغناطيسية، والضعيفة، والقوية، والمقدار الذي يعزى إلى هيجز أو أي آليات أخرى غير معروفة.

أحد الأسئلة الواضحة التي ظلت بلا إجابة حتى الآن هو السؤال عما إذا كان التأثر التقالي يشارك في القصور الذاتي والكتلة للجسيمات أم لا. إذا ما تمكنّا من تكمية المجال التقالي وتم تأكيد وجود الجرافيتون، فإن التأثر التثاقلي سوف يسهم في القصور الذاتي والكتلة أيضًا، وربما يفسر حتى كتلة البوزون Z.

لكن ينبغي خصوصًا التأكيد على أن الآلية المقترحة التي تؤدي إلى ظهور القوة الذاتية المؤثرة على جسيم لاقصوري ليست افتراضية. فهي تنتج مباشرة من الآلية المقبولة المسؤولة عن أصل قوى التجاذب والتنافر في النموذج المعياري عند الأخذ في الاعتبار الاعتماد الاتجاهي نتيجة النسبية العامة لترددات الكمّات الافتراضية *الواردة*. وبالتالي، فإن النموذج المعياري يقول بالفعل شيئًا مهمًا حول أصل القصور الذاتي والكتلة.

من المؤكد على المستوى المفاهيمي، في النموذج المعياري، أن الارتدادات التي تشكل جميع الكمّات الافتراضية الواردة (المزاحة نحو الأزرق أو الأحمر)، الممتصة بواسطة الشحنات اللاقصورية الكهربية، والضعيفة والقوية، لا تلغي بعضها بعضًا وتؤدي إلى ظهور قوة قصورية. إلا أن التحليل المفاهيمي وحده ليس كافيًا لإحراز أي تقدم في الفيزياء.

أما حساب القوة الذاتية الناشئة من الارتدادات اللامتزنة من الكمّات الافتراضية الممتصة بواسطة جسيم لاقصوري فهو أمر ليس عسيرًا فقط، وإنما ميئوس منه تقريبًا، لوجود مجاهيل عديدة. فالكمّات الافتراضية

جسيمات بلا غلاف كتلة، مما يعني أن طاقتها وكمية تحركها وكتلتها لا تخضع للمعادلة النسبوية:

$$E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2 .$$

وبخلاف كمية تحرك الفوتون العادي، التي تُعطى بالعلاقة $p = E/c$، فإن كمية تحرك الفوتون الافتراضي لا تساوي E/c. ومجهول أيضًا طاقة مجال لشحنة (الكهرومغناطيسي، أو الضعيف، أو القوي) بدلالة طاقات الكمّات الافتراضية التي تشكل 'مجال' الشحنة، وأزمنة العمر وطاقات الكمّات الافتراضية الفردية، وزمن الامتصاص الذي تستغرقه كمّة افتراضية ما لكي تُمتص بواسطة شحنة.

في محاولة للتغلب على تلك الصعوبات سوف نجري حسابات شبه كلاسيكية للقوة الذاتية في حالة التآثرات الكهرومغناطيسية في الديناميكا الكهربية الكمومية؛ يمكن اجراء حسابات مشابهة من أجل التآثرات الأخرى. لهذا الغرض سوف توضع الافتراضات التالية. يبدو من الطبيعي تعريف طاقة المجال الكهربي لشحنة ما في الديناميكا الكهربية الكمومية بأنها مجموع الطاقات لكل الفوتونات الافتراضية التي تشكل المجال عند لحظة معينة. يتجنب ذلك التعريف قضية بُعديّة الشحنة. ولكي نستبعد بعض المجاهيل المذكورة أعلاه، يمكن أيضًا تعريف مكافئ لطاقة مجال الشحنة بدلالة الطاقة الكلية لعدد الفوتونات الافتراضية الممتصة بواسطة الشحنة خلال زمن المُميِّز δt. (يمكن النظر إلى δt هذا على أنه الزمن الذي خلاله تقوم الشحنة بتجديد مجالها). يمكن التعبير عن أزمنة العمر لجميع الفوتونات الافتراضية بدلالة δt على أنها $\alpha\delta t$، حيث α عدد حقيقي. عندئذ ستكون المسافة المقطوعة بواسطة الفوتون الافتراضي أثناء أزمنة عمرها هي $\alpha r = \alpha c\delta t$، حيث من الواضح أن $r = c\delta t$، هي المسافة المقطوعة بواسطة فوتون

افتراضي أثناء الزمن المميِّز δt. من المفترض أن يكون الزمن الذي يُمتص خلاله فوتون افتراضي بواسطة شحنة هو δt. يمكن اعتبار كمية التحرك لفوتون افتراضي على أنها $p^a = \beta(E^a/c)$، حيث β أيضًا عدد حقيقي و E^a الطاقة المزاحة نحو الأزرق أو الأحمر للفوتون الافتراضي الذي تمتصه شحنة متسارعة. تُعَيِّن E^a في إطار الإسناد المتسارع N^a الذي تكون فيه الشحنة ساكنة.

في N^a، يمكن كتابة تردد فوتون افتراضي قادم من اتجاه ما نحو الشحنة (كما يظهر للشحنة) على الصورة المتجهية

$$f^{\mathrm{a}} = f\left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\right). \qquad (9.19)$$

حيث f هو التردد المقاس عند $\mathbf{r} = \mathbf{0}$ و $\mathbf{r} = \mathbf{n}r$، و $\mathbf{n}$ هو متجه وحدة يشير في اتجاه الشحنة ويحدد اتجاه الفوتون الافتراضي الوارد.

باستخدام مبدأ عدم اليقين، تكون طاقة فوتون افتراضي عمره δt في N^a هي $\Delta E^a \propto h/\delta t$. ستكون طاقة فوتون افتراضي عمره $\alpha\delta t$ هي $\Delta E^a \propto h/\alpha\delta t = \Delta E^a/\alpha$. وباستخدام (٩,١٩)، يمكن كتابة طاقة هذا الفوتون الافتراضي على الصورة

$$\Delta E^{\mathrm{a}}_{\alpha} = \frac{\Delta E^{\mathrm{a}}}{\alpha} = \frac{hf^{\mathrm{a}}}{\alpha} = \frac{hf}{\alpha}\left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\alpha\right) = \frac{\Delta E}{\alpha}\left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\alpha\right),$$

حيث $\Delta E/\alpha = hf/\alpha$ هي طاقة ذلك الفوتون الافتراضي معينة عند $\mathbf{r} = \mathbf{0}$ عندئذ ستكون كمية تحرك الفوتون الافتراضي هي

$$\Delta p^{\mathrm{a}}_{\alpha\beta} = \frac{\Delta E^{\mathrm{a}}_{\alpha}}{c}\beta = \frac{\Delta E^{\mathrm{a}}}{c\alpha}\beta = \frac{\Delta E\beta}{c\alpha}\left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\alpha\right).$$

افترض أن عدد الفوتونات القادمة من اتجاه n في نطاق الزاوية المجسمة $d\Omega$، والتي يتم امتصاصها أثناء الزمن المميِّز δt، هو x. عندئذ تكون كمية تحرك جميع الفوتونات الافتراضية x هي

$$\sum_{i=1}^{x} \Delta p^{\mathrm{a}}_{\alpha_i \beta_i} \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega = \sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta E^{\mathrm{a}} \beta_i}{c\alpha_i} \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega = \sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta E \beta_i}{c\alpha_i} \left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\alpha_i\right) \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega \, .$$

القوة الناتجة من الارتدادات من جميع الفوتونات الافتراضية x هي

$$\mathrm{d}\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = \sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta p^{\mathrm{a}}_{\alpha_i \beta_i}}{\delta\tau} \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega \, .$$

إذًا تكون القوة الذاتية المؤثرة على الشحنة والناتجة من الارتدادات اللامتزنة لجميع الفوتونات الافتراضية الممتصة أثناء الزمن المميِّز δt والقادمة من جميع الاتجاهات نحو الشحنة هي

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} &= \int \sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta p^{\mathrm{a}}_{\alpha_i \beta_i}}{\delta\tau} \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega = \int \sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta E \beta_i}{c\delta\tau\alpha_i} \left(1 - \frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{c^2}\alpha_i\right) \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega \\ &= \int \sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta E \beta_i}{c\delta\tau\alpha_i} \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega - \int \sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta E \beta_i}{c^3\delta\tau} (\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}) \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega \, . \end{aligned} \qquad (9.20)$$

نتيجة للتماثل، يكون أول عدد صحيح في (٩,٢٠) هو الصفر. وبملاحظة أن $\mathbf{r} = \mathbf{n}r$ و $r = c\delta t$، يمكننا بالنسبة للقوة الذاتية كتابة

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = -\sum_{i=1}^{x} \frac{\Delta E \beta_i \delta t}{c^2\delta\tau} \int (\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}) \mathbf{n} \mathrm{d}\Omega \, . \qquad (9.21)$$

التكامل في (٩,٢١) مشابه لذلك الذي تم حسابه في ملحق D:

$$\int (\mathbf{a}\cdot\mathbf{n})\,\mathbf{n}\,d\Omega = \frac{4\pi}{3}\mathbf{a}\,.$$

بالتعويض بهذه النتيجة في (٩,٢١) مع الأخذ في الاعتبار حقيقة أن

$$U = 4\pi\sum_{i=1}^{N}\Delta E\beta_i$$

هي الطاقة الكلية لجميع الفوتونات الافتراضية (القادمة من جميع الاتجاهات بزاوية مجسمة 4π) الممتصة أثناء الزمن δt، فإننا نحصل بالنسبة للقوة الذاتية على

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = -\frac{1}{3}\frac{\delta t}{\delta\tau}\frac{U}{c^2}\mathbf{a}\,.$$

الطاقة U تمثل طاقة مجال الشحنة. وبالتالي فإن الكمية U/c^2 هي الكتلة المناظرة لطاقة المجال الكهربي للشحنة والتي يمكن اعتبارها كتلتها الكهرومغناطيسية $m^a = U/c^2$.

دعنا الآن نضع في الاعتبار الإسهامات من التأثرات الكهرومغناطيسية، الضعيفة والقوية في القوة الذاتية المؤثرة على جسيم يشارك في التآثرات الثلاث. ستكون القوة الذاتية في هذه الحالة

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = -m^{\mathrm{a}}\mathbf{a}\,, \qquad (9.22)$$

حيث

$$m^{\mathrm{a}} = \frac{1}{3}\frac{\delta t^{\mathrm{E}}}{\delta\tau^{\mathrm{E}}}\frac{U^{\mathrm{E}}}{c^2} + \frac{1}{3}\frac{\delta t^{\mathrm{W}}}{\delta\tau^{\mathrm{W}}}\frac{U^{\mathrm{W}}}{c^2} + \frac{1}{3}\frac{\delta t^{\mathrm{S}}}{\delta\tau^{\mathrm{S}}}\frac{U^{\mathrm{S}}}{c^2}$$

يمكن اعتبارها الكتلة القصورية للجسيم التي تحتوي على إسهامات من التآثرات الكهرمغناطيسية، والضعيفة(*) والقوية. في معادلة m^{a}، يحتوي الحدّان الثاني والثالث على الطاقتين U^{W} و U^{S} للمجالين الضعيف والقوي، وتكون الأزمنة δt^{W}، $\delta \tau^{W}$، δt^{S}، و $\delta \tau^{S}$ مناظرة للتآثرات الضعيفة والقوية.

على الرغم من حقيقة أن الحسابات شبه كلاسيكية، فإن كل شيء في القوة الذاتية (٩,٢٢) يُبين أنه يمكن اعتبارها القوة القصورية التي تتعرض لها شحنة متسارعة – فهي متناسبة مع التسارع بإشارته الصحيحة، ويكون لثابت التناسب أبعاد الكتلة. الكتلة m^{a} في (٩,٢٢) قصورية لأنها مقياس للمقاومة التي تبديها الشحنة لتسارعها، وهي في الأصل كهرومغناطيسية، وضعيفة، وقوية.

اعتبر الآن شحنة كهربية ساكنة في مجال ثقالي شدته **g**. وطبقًا للنسبية العامة، فإن تردد فوتون افتراضي وارد ممتص بواسطة الشحنة سيكون مُزاحًا:

$$f^{g} = f\left(1 + \frac{\mathbf{g}\cdot\mathbf{r}}{c^{2}}\right), \qquad (9.23)$$

حيث يحدد **r** اتجاه الحركة للفوتون الافتراضي الوارد. إذا كان يقترب نحو الشحنة من 'أعلى' (متحركًا نحو الكتلة صانعًا المجال الثقالي)، فإن الفوتون الافتراضي سيكون مُزاحًا نحو الأزرق؛ وإذا كان يقترب نحو الشحنة من 'أسفل' (مبتعدًا عن الكتلة)، فإنه سيكون مُزاحًا نحو الأحمر.

(*) للتبسيط، تم أخذ سرعة حاملات التآثر الضعيف على أنها تساوي c.

وكما في حالة شحنة متسارعة، تؤدي الارتدادات اللامتزنة من الفوتونات الافتراضية الممتصة أثناء الزمن δt بواسطة شحنة ساكنة في مجال ثقالي إلى ظهور قوة ذاتية

$$\mathbf{F}^{g}_{\text{self}} = \frac{1}{3}\frac{\delta t}{\delta \tau}\frac{U}{c^2}\mathbf{g}\,.$$

هنا

$$U = 4\pi \sum_{i=1}^{x} \Delta E \beta_i$$

هي أيضًا الطاقة الكلية لجميع الفوتونات الافتراضية (القادمة من جميع الاتجاهات بزاوية مجسمة 4π) الممتصة بواسطة الشحنة اللاقصورية أثناء الزمن δt.

عند الأخذ في الاعتبار الإسهامات من التأثرات الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية، فإن القوة الذاتية تصبح

$$\mathbf{F}^{g}_{\text{self}} = m^{g}\mathbf{g}\,, \qquad (9.24)$$

حيث

$$m^{g} = \frac{1}{3}\frac{\delta t^{\mathrm{E}}}{\delta \tau^{\mathrm{E}}}\frac{U^{\mathrm{E}}}{c^2} + \frac{1}{3}\frac{\delta t^{\mathrm{W}}}{\delta \tau^{\mathrm{W}}}\frac{U^{\mathrm{W}}}{c^2} + \frac{1}{3}\frac{\delta t^{\mathrm{S}}}{\delta \tau^{\mathrm{S}}}\frac{U^{\mathrm{S}}}{c^2}$$

تُفَسَّر على أنها الكتلة الثقالية المطاوعة لجسيم مُشارك في تأثرات كهرومغناطيسية وضعيفة وقوية.

يوضح كل شيء في القوة الذاتية (٩,٢٤) أنه يمكن اعتبارها قوة ثقالية مؤثرة على جسيم مُعلّق في مجال ثقالي ومشارك في التأثرات الثلاث – فهي متناسبة مع التسارع الثقالي بإشارته الصحيحة، ويكون لثابت التناسب أبعاد

الكتلة. واضح أن القوة الذاتية (٩,٢٤) تكون قصورية – فهي تظهر فقط عندما يُمنع الجسيم من اتباع مسار جيوديسي (أيْ عندما يمنع من السقوط في المجال الثقالي)؛ سيكون الجسيم معرضًا في هذه الحالة فقط للارتدادات اللامتزنة من الكمّات الافتراضية الواردة التي تكون ترددتها مُزاحة كما هو مبين في (٩,٢٣). يُنظر على نحو تقليدي للكتلة m^g في (٩,٢٤) على أنها كتلة ثقالية مطاوعة، ولكن بما أنها مقياس المقاومة التي تبديها الشحنة عندما تحيد عن مسارها الجيوديسي، فمن الواضح أن m^g تكون في الأصل قصورية وكهرومغناطيسية، وضعيفة، وقوية. لهذا تتطابق الكتلتان m^a و m^g – فهما ببساطة الشيء نفسه:

- مقياس المقاومة التي يبديها جسيم عندما يُمنَع من اتباع مسار جيوديسي،
- الكتلة التي تناظر مجالات الجسيم.

عندما يسقط جسيم في مجال ثقالي، لا تكون ترددات الكمّات الافتراضية الواردة مُزاحة، وذلك كما يظهر للجسيم. تلغي الارتدادات من الكمّات الممتصة بعضها بعضًا، ويتحرك الجسيم بأسلوب غير مُقاوِم – يكون خطه الكوني جيوديسيًا. إذًا ما يجعل الخط الكوني لجسيم ما جيوديسيًا بالنسبة إلى النموذج المعياري هو الإلغاء التام للارتدادات من الكمّات الافتراضية الواردة التي يعانيها الجسيم.

إن المعادلتين (٩,٢٢) و(٩,٢٤) تأخذان شكل قانون نيوتن الثاني. من ناحية، كما يتضح من النموذج المعياري لا يكون سلوك جسيم ما محكومًا بقانون نيوتن الثاني الحتمي. من الناحية الأخرى، مع ذلك، يكون أي جسيم لاقصوري في النموذج المعياري مُعرَّضًا لقوة قصورية أو ثقالية ينبغي أن تأخذ شكل قانون نيوتن الثاني.

في هذا القسم، حاولنا تفسير أصل القصور الذاتي بدلالة الارتدادات اللامتزنة من الكمّات الافتراضية الممتصة. إلا أنه من غير الممكن تفسير أصل القصور الذاتي على نحو تام دون الإجابة عن السؤال حول أصل تلك الارتدادات – ما إذا كان وجودها الحتمي يقتضي ضمنًا أنها بسبب نوع ما من القصور الذاتي للكمّات الافتراضية نفسها. وعلى الرغم من أنه كانت هناك محاولات لإضفاء صفة القصور الذاتي على الفوتون الطبيعي [١٥٢، ١٥٣]، فإن هذه القضية في حاجة إلى دراسة دقيقة. لكن حتى لو اتضح أن الكمّات الافتراضية تمتلك بالفعل قصورًا ذاتيًا، فإن الآلية المفحوصة في إطار النموذج المعياري ستظل تفسر على الأقل المظاهر الماكروية للقصور الذاتي.

٩,٥ ملخص

إن القضية الرئيسية المُناقشَة في هذا الفصل هي ما إذا كان القصور الذاتي هو مظهر آخر لواقعية الزمكان. أظن أن مينكوفسكي كان سيشعر بالسعادة وهو يدرس احتمال أن القصور الذاتي قد يتضح أنه مظهر لبعدية الكون الرباعية.

إذا كان الأنبوب الكوني لجسيم جسمًا واقعيًا رباعي الأبعاد، فإن عليه نتيجة لذلك أن يقاوم تشوهه. وبما أن الأنبوب الكوني لجسيم متسارع يكون مشوهًا (لاجيوديسيًا)، فإن المقاومة التي يبديها الجسيم لتسارعه تبدو أنها تنشأ من إجهاد رباعي الأبعاد ينشأ في الأنبوب الكوني المشوه للجسيم. يؤدي هذا الإجهاد، الذي تسببه إزاحات مكونات الجسيم المتسارع عن مواضع إتزانها، إلى ظهور قوة استرداد تحاول استعادة جميع المكونات لمواضعها اللاتسارعية.

لقد تم فحص آلية الإزاحة في حالة الإلكترون الكلاسيكي وقد وُجِد أن القوة الذاتية الناتجة والمؤثرة على الإلكترون الكلاسيكي عندما يتسارع أو يكون مُعَلّقًا في مجال تثالي تأخذ بالفعل شكل القوة القصورية. يتضح أن آلية الإزاحة نفسها هذه موجودة في النموذج المعياري أيضًا. إن آلية التأثرات المقبولة خلال تبادل الكمّات الافتراضية في النموذج المعياري، بجانب الانزياح الترددي في النسبية العامة للكمّات الافتراضية الممتصة بواسطة جسيم لاقصوري، تؤدي إلى تأثيرات تأثر ذاتي معتمد على التسارع، مما يبدو أنه يفسر أصل القصور الذاتي والكتلة للجسيمات. تساهم جميع التأثرات التي يتعامل معها النموذج المعياري – الكهرومغناطيسية، والضعيفة، والقوية – في القصور الذاتي والكتلة للجسيمات المشاركة في هذه التأثرات.

قد يكون هناك جدال حول أن آلية القصور الذاتي التي تمت دراستها في هذا الفصل يمكن وصفها أيضًا بلغة الأبعاد الثلاثية العادية. هذا صحيح. إلا أن السؤال الحقيقي يكون عما إذا كان القصور الذاتي موجودًا في الكون ثلاثي الأبعاد. إننا لم نجب على هذا السؤال هنا. ما أظهرناه هو أنه، إذا كان الزمكان واقعيًا، فإنه من الحتمي وجود قصور ذاتي. سيكون وجود قصور ذاتي خلال آلية ما، هي الآلية المفحوصة هنا، هو أحد مظاهر بعدية الكون الرباعية.

الفصل العاشر

الزمكان وطبيعة الأجسام الكمومية

أظن أنني أستطيع القول بأمان إن أحدًا لا يفهم ميكانيكا الكم [...]، وإذا كان بإمكانك أن تتجنبها، فكف عن أن تقول في نفسك "لكن كيف يمكن لها أن تكون كذلك"، لأنك سوف تصل إلى طريق مسدود لم ينج منه أحد بعد. لا أحد يعرف كيف يمكن لها أن تكون كذلك.

ر. فينمان [١٥٥]

رأينا في الفصول الثلاثة السابقة أن أخذ واقعية الزمكان والأنابيب الكونية للأجسام الفيزيائية على محمل الجد لم يزودنا فقط بفهم أعمق للمعنى الفيزيائي للتأثيرات النسبوية المُناقشة، وللظواهر الفيزيائية في أطر الإسناد اللاقصورية، وإنما ساعدنا أيضًا على الوصول إلى آلية مُحتملة لأصل القصور الذاتي (كمظهر آخر لبعدية الكون الرباعية) التي تفسر أيضًا التكافؤ بين القصور الذاتي والكتل الثّقالية المُطاوعة. في ضوء هذه النجاحات، من الطبيعي أن نسأل عما إذا كان بالإمكان أن يزودنا هذا النهج نفسه بتبصر مماثل في طبيعة الظواهر الكمومية.

لا يُعني هذا الفصل بمناقشة أسس ميكانيكا الكم، فغرضه الوحيد هو توضيح أن فكرة البعدية الرباعية تتطلب إجابة لسؤال: ما هو الجسم الكمومي

في الزمكان؟ هذه الرؤية تجعل من الممكن أيضًا تمييز الفرض الضمني بأن الأجسام الكمومية موجودة باستمرار مع الزمن، مما يلقي بعض الضوء على طبيعتها، لأن الدليل التجريبي يوضح أن الأجسام الكمومية ليست خطوطًا كونية في الزمكان.

١٠,١ هل الاحتمالات الميكانيكية الكمومية موضوعية؟

في هذا القسم سوف نفحص بتفصيل أكثر ما إذا كان هناك تضارب أو عدم تضارب بين وجود الزمكان والطبيعة الاحتمالية لميكانيكا الكم. لا يوجد تضارب على المستوى الماكروي كما هو موضح في ملحق A. وعلى الرغم من ذلك، لا توجد دلائل على أن بعدية الكون على المستوى الميكروي، الذي تعمل فيه معظم ميكانيكا الكم، تكون مختلفة عنها على المستوى الماكروي. وبالتالي فإنه ينبغي تطبيق الزمكان على مستوى ميكانيكا الكم أيضًا. يبدو أن هذا يقتضي ضمنًا أن تُعطى أيضًا التواريخ الكاملة في زمن الأجسام الكمومية بالكامل، مما يبدو أنه يبين أن التنبؤات الاحتمالية لميكانيكا الكم تتعارض لا محالة مع وجهة نظر البعدية الرباعية.

ذلك التناقض، إذا وُجد، يشكل أزمة حقيقية في الفيزياء. فمن ناحية، يمكن تفسير الدليل التجريبي الذي يؤكد نتائج النسبية الخاصة فقط بدلالة زمكان واقعي. ومن الناحية الأخرى، على الرغم من ذلك، التنبؤات الاحتمالية لميكانيكا الكم تكون هي الأخرى مؤكدة تجريبيًا. وبما أن النتائج التجريبية لا يمكنها مناقضَة بعضها البعض، فيبدو من الوهلة الأولى أنه إما أن يكون تفسير الزمكان للتأثيرات النسبوية خاطئًا وإما أن التفسير الاحتمالي للتجارب المؤكدة لميكانيكا الكم ليس صحيحًا. أول شيء يجب فعله في حالات كهذه هو اختبار ما إذا كان التناقض المؤدي لتلك المعضلة واقعيًا.

من المغري افتراض أن السلوك الواقعي للأجسام الكمومية يكون حتميًا ولكن معرفتنا بها ليست مكتملة، ولهذا يتحتم علينا استخدام وصف احتمالي. قد يعني هذا أنه، كما في الحالة الكلاسيكية، ربما تكون الخطوط الكونية للأجسام الكمومية معطاة بالكامل أيضًا ومن ثم يكون وصف الأجسام الاحتمالي، بسبب معرفتنا الغير مكتملة، غير عاكس لاحتمال موضوعي (أنطولوجي). سوف نرى بعد قليل أن ذلك التفسير يناقض الدليل التجريبي القائم.

إذا كان الاحتمال في ميكانيكا الكم ليس أبستمولوجيًا (مما يعكس معرفتنا الغير مكتملة) وإنما أنطولوجيًا، فإن السؤال الطبيعي هو كيف ينبغي فهم الاحتمال الموضوعي. ربما يكون من المسلم به أن الاحتمال الموضوعي يعني مستقبلاً مكشوفًا – مستقبلاً مجهولاً (كما تقضي وجهة نظر البعدية الثلاثية)، وبالتالي لا يمكن التنبؤ يقينًا بالتواريخ المستقبلية للأجسام الكمومية. لو كان الحال كذلك، فقد يكون التناقض بين ميكانيكا الكم ووجهة نظر البعدية الرباعية لا مفر منه. ولكن هل الحال فعلاً كذلك؟

أفضل توضيح لمقولة أن البعدية الثلاثية تلك (التي طبقًا لها يكون المستقبل مكشوفًا) لا تقتضي بالضرورة احتمالية موضوعية إنما يكون عن طريق حقيقتين. الأولى، في ضوء رؤية البعدية الثلاثية، يُنظر إلى النظريات الكلاسيكية (مثل الميكانيكا النيوتونية والنسبية الخاصة والعامة) على أنها أيضًا نظريات حتمية (وليست احتمالية). والثانية، إذا كان الاحتمال الموضوعي يعني مستقبلاً غير موجود، وبالتالي غير حتمي، فينتج من ذلك أن الشخص كان يمكنه التحدث عن الاحتمال الموضوعي في الماضي، لأن الماضي قد حدث وتحدد بالفعل. وهذا يعني أن السلوك الماضي للأجسام الكمومية لم يكن من الممكن أن يكون احتماليًا بموضوعية. ولكن تجربة الشق المزدوج باستخدام إلكترونات (أو بروتونات) فردية، على سبيل المثال،

توضح أن ذلك ليس صحيحًا – عندما يرتطم إلكترون فردي بالشاشة، فإن سلوكه الماضي لا يزال غير حتمي (احتماليًا) لأنه ليس واضحًا من خلال أي من الشقين مر الإلكترون(*).

لذا يبدو أن واقعية أو لاواقعية المستقبل لا علاقة لها بموضوعية السلوك الاحتمالي للإلكترون. ثم كيف ينبغي لنا أن نفهم الاحتمال الأنطولوجي (الموضوعي)؟ ما يجعل هذا السؤال تحديدًا صعبًا على بعض العلماء هو حدسهم القوي بأنه لا يوجد مكان للاحتمال الأنطولوجي في الطبيعة لأنها لم تكن 'لتعلم' هي نفسها ما إذا كان الاحتمال موضوعيًا. تبدو مقولة آينشتين الشهيرة "الإله لا يلعب النرد" أنها تعبر عن الموقف نفسه تجاه هذا الفهم للاحتمال.

ولكن إذا اتضح أن واقعية المستقبل ليست ذات صلة بطبيعة السلوك الاحتمالي للأجسام الكمومية، فمن الطبيعي افتراض أن ذلك السلوك ذاتي intrinsic في الجسم الكمومي نفسه. إذًا السؤال الرئيسي والواقعي على النحو التالي:ما هي طبيعة الإلكترون، على سبيل المثال، الذي يكون بإمكانه المرور من خلال كلا الشقين. بتحديد أكثر، ما هو نموذج الزمكان للإلكترون؟

كانت قضية طبيعة الاحتمال ستصبح مشروعًا بحثيًا مثيرًا لفريق البحث الجذري. قد يكون مفيدًا للقارئ أن يحلل تلك القضية ويرى ما يمكن أن يستخلصه من نتائج. إننا لن نجري ذلك التحليل هنا لأن ذلك قد يأخذ وحده على الأقل فصلاً كاملاً. فضلاً عن ذلك، سوف نتناول القضية نفسها من زاوية

(*) هذا هو التفسير النموذجي للسلوك الاحتمالي للإلكترون في هذه التجربة. لكن على وجه التدقيق، هذا التفسير غير صحيحًا لأنه يقضي بأن الإلكترون في الواقع ذهب من خلال أحد الشقين فقط، بينما تتنبأ ميكانيكا الكم أن عليه المرور خلال كلا الشقين من أجل أن يُلاحظ نمط (نموذج) تداخل على الشاشة.

مختلفة ونصل إلى النتيجة نفسها غير المتوقعة، وهي أن سلوك جسم ما يكون حتميًا إذا تواجد باستمرار مع الزمن، بينما يقتضي السلوك الاحتمالي موضوعيًا لجسيم ما أن يكون وجود الجسيم غير مستمر مع الزمن. سوف نحصل على نتيجة أخرى مدهشة – وهي أن وجود الاحتمال الموضوعي لا يستلزم أن تكون الطبيعة لا 'تعرف' نفسها.

١٠,٢ طبيعة الجسم الكمومي وطبيعة الزمكان

في عام ١٩٢٦ أعطى بورن – Born تفسيرًا احتماليًا للخواص الموجية للجسيمات – للإلكترون، على سبيل المثال. اقترح أن الموجة 'الملحقة' بالإلكترون لم تكن موجة واقعية وإنما موجة احتمال – احتمال العثور على إلكترون ما عند نقطة معينة، مثلاً. كان التفسير النموذجي لميكانيكا الكم – المسمى بتفسير كوبنهاجن – Copenhagen – منذ ذلك الحين معتمدًا على هذا التفسير الاحتمالي للخواص الموجية للجسيمات الأولية.

إن تفسير كوبنهاجن لميكانيكا الكم، على الرغم من ذلك، لا يجيب على سؤال يتعلق بما هية الجسم الكمومي عندما لا يُقاس. وأقر بأن هذا النوع من الأسئلة لا معنى له، لأن المعلومات الوحيدة التي لدينا تأتي من التجربة، وبالتالي لا يمكننا طرح أسئلة عن ما لم نقم بقياسه. لكن الحقيقة الراسخة التي تفيد بأن أي إلكترون يكون موجودًا من قبل أن يُقاس تقتضي ضمنًا أن يكون شيئًا ما وفي مكانٍ ما. أجبرت الحجة من هذا النوع بعض أنصار تفسير كوبنهاجن أن يقدموا مزاعم متطرفة، مثلاً، أن الجسم الكمومي لا يكون موجودًا أثناء الفترة الزمنية التي لا يُقاس فيها. لا أحد الآن يأخذ مثل تلك المزاعم بمحمل الجد. ولكن يظل اللغز قائمًا لأنه لا أحد يعلم ما هو نموذج

الزمكان للجسم الكمومي. أظن، بهذا المعنى، أن آينشتين كان على صواب في أن ميكانيكا الكم غير مكتملة أساسًا.

لإدراك الصعوبة بصورة أفضل، اعتبر إلكترونًا في غرفة. طبقًا لميكانيكا الكم يوجد احتمال متساوٍ للعثور على الإلكترون في أي مكان بالغرفة (ليس قريبًا من الحوائط). لو كان الإلكترون جسيمًا شبه نقطي (متموضعًا)، لما كانت ميكانيكا الكم نظرية كافية لأن الإلكترون قد يكون في مكان معين عند زمن معين، بينما ستخبرنا النظرية أنه كان من الممكن أن يُعثر عليه باحتمال متساوٍ في أي مكان في الغرفة. إذا افترضنا أن الإلكترون ليس متموضعًا ولكنه نوع ما من مائع يشغل الغرفة بالكامل، فلماذا إذًا لا نستطيع أن نعزل جانبًا كسرًا من شحنته؟ أيضًا، في هذه الحالة، ينبغي على الإلكترون أن ينهار لحظيًا إلى النقطة التي يُقاس عندها، مما قد يناقض النسبية. لذا فلا يمكن للإلكترون أن يكون صغيرًا (شبه نقطي) ولا نوعًا ما من مائع يشغل الحجم الكامل الذي تكون فيه الدالة الموجية مختلفة عن صفر. من الناحية الأخرى، دائمًا ما يُقاس الإلكترون على أنه جسيم متموضع.

كانت هناك محاولات مختلفة لحل ثنائية الموجة–الجسيم للأجسام الكمومية مؤدية إلى الصعوبات أعلاه. أحدها يقول تحديدًا: تتنبأ ميكانيكا الكم بأن الإلكترون في مستوى طاقته الأرضي في ذرة الهيدروجين يمكن العثور عليه حول النواة (البروتون) باحتمال معين. لو كان يُنظر للإلكترون على أنه جسيم، أيْ متموضع في مكان ما فوق البروتون، لاستوجب ذلك أن يكون لذرة الهيدروجين عزم ثنائي القطب في مستوى طاقتها الأرضي. تُبين كلٌ من ميكانيكا الكم والتجربة أن الحال ليس كذلك. قد يُصوِر شخص ما الإلكترون وهو يدور مسرعًا للغاية حول البروتون لدرجة أن ما يُقاس

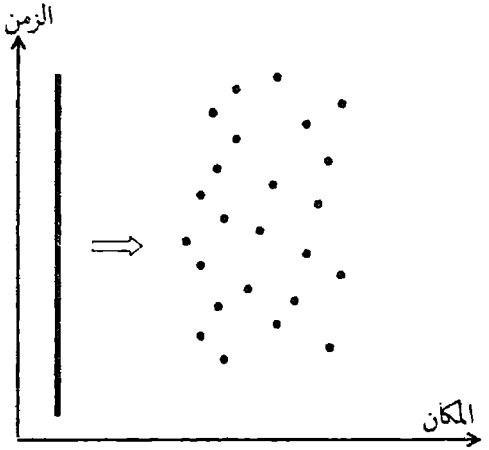
تجريبيًا هو القيمة المتوسطة لعزم ثنائي القطب خلال زمن القياس. وبما أن هناك تماثلاً كرويًا في مستوى الطاقة الأرضي، فإن جميع عزوم ثنائي القطب تلغي بعضها بعضًا تمامًا – فتكون القيمة المتوسطة صفرًا. قام مادلنج[*] – Madelung لإثبات تلك الفرضية بحساب السرعة المدارية للإلكترون التي تؤكد أن جميع عزوم ثنائي القطب تلغي بعضها بعضًا أثناء القياس. اتضح أن سرعة الإلكترون المدارية ينبغي أن تكون أكبر ببضع قيم أسية من سرعة الضوء. يبين هذا أن شحنة الإلكترون ينبغي لها بطريقة ما أن تكون في الواقع موزعة حول البروتون. بمعنى آخر، *ينبغي أن يكون الإلكترون موجودًا في كل مكان يكون فيه احتمال العثور عليه مختلفًا عن صفر*. مثل ذلك المُتَطلّب يحل مشكلة انعدام عزم ثنائي القطب لذرة الهيدروجين، ولكن تظل حقيقة أنه لم يتم أبدًا عزل كسر من الإلكترون جانبًا دون تفسير. إن هذه لمفارقة ميكانيكية كمومية نموذجية – دائمًا ما يُقاس أي إلكترون على أنه كيان متموضع، ولكن قبل اكتشافه، يشغل الحجم الكامل الذي لا تكون فيه دالته الموجية صفرًا؛ لا يمكن، على الرغم من ذلك، اكتشاف انتشار الإلكترون في الحجم.[**]

(*) في مايو ١٩٨٩ كان عليّ أن أغادر بلغاريا خلال مهلة ٢٤ ساعة، وفُقِدَت محفوظاتي. لم أتمكن منذ ذلك الحين من العثور على مرجع ورقة مادلنج البحثية.

(**) سيكون أول رد فعل طبيعي القول بأنه، لو كان اكتشاف شيء ما ليس بالإمكان، فمن اليقين إلى حد ما أنه غير موجود – استبعد فريق البحث الجذري وجود الحركة المنتظمة المطلقة تحديدًا لهذا السبب. فهل ينبغي علينا إذًا استنتاج أن أي إلكترون لا يكون موجودًا في الحجم قبل أن يكون مُقاسًا؟ مثل تلك الحالات تكون مختلفة. إن وجود إلكترون الهيدروجين حول النواة يوَضّح بصورة غير مباشرة بواسطة حقيقة أن ذرة الهيدروجين لا تملك عزم ثنائي القطب في مستوى طاقتها الأرضي. مثال آخر هو وجود الجسيمات الافتراضية. لا يمكن اكتشافها بطريقة مباشرة، ولكن لها مظاهر تأييد غير مباشرة.

ليس عند أي أحد فكرة عن أنه كيف يمكن لإلكترون أن يتواجد بالفعل في كل المنطقة التي تكون فيها دالته الموجية مختلفة عن الصفر. الأمر الوحيد الذي نعلمه يقينًا هذه المرة هو أن الأجسام الكمومية ليست خطوطًا كونية في الزمكان. ما نظن أننا نعرفه هو ما يمكن توضيحه بأفضل صورة في حالة تجارب التداخل المُجراه بإلكترونات فردية [١٥٦].

في تجارب الشق المزدوج تلك، يسفر تراكم الارتطامات المتعاقبة للإلكترون الفردي على الشاشة عن بناء نموذج (نمط) التداخل الذي يوضح السلوك الموجي للإلكترونات الفردية. عند النظر إلى الشاشة، كل إلكترون فردي رُصِد ككيان متموضع ويكون السؤال الطبيعي عما إذا كان الإلكترون هو ذلك الكيان قبل أن يرتطم بالشاشة. يقودنا حدسنا لفرض أنه، إذا كان الإلكترون يرتطم بالشاشة ككيان متموضع، فإنه يكون ذات الكيان عند كل لحظة من الزمن، مما يعني أن الإلكترون يكون موجودًا باستمرار مع الزمن ككيان متموضع. لكن لو كان الحال كذلك، لتصرف كل إلكترون فردي على أنه جسيم عادي، ولكان عليه أن يمر فقط من خلال شق واحد لا يُلاحَظ منه أي نمط تداخل على الشاشة. لهذا، فإن الإلكترون لا يمكن أن يكون كيانًا متموضعًا عند كل لحظات الزمن، أيْ لا يمكن أن يكون خطًا كونيًا في الزمكان.



شكل ١٠,١ فكرة الذرية الرباعية. يُمَثّل الإلكترون، ليس بخطه الكوني (الخط المتصل)، وإنما بالنقط التي تشكل الخط الكوني.

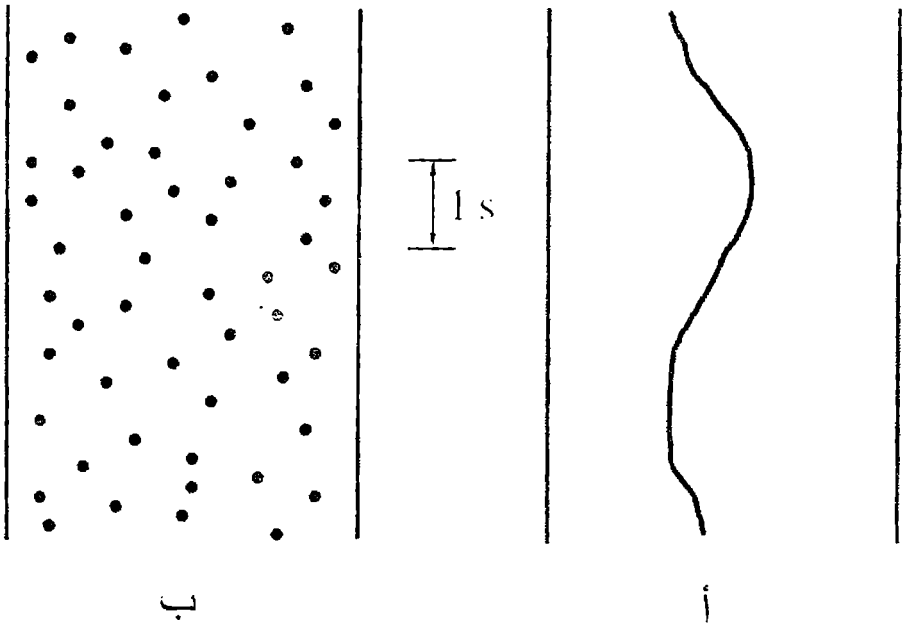
إن المفارقة – يتحتم على كل إلكترون فردي أن يمر خلال كلا الشقين (وذلك لكي يرتطم بالشاشة، حيث تتكون هناك الهدب 'المضيئة' لنمط التداخل)، ولكنه دائمًا ما يُرصَد على الشاشة ككيان متموضع – هي حتمًا بسبب افتراض ما ضمني نأخذه كأمر مسلم به. وبالفعل، يبدو أن الفحص الأدق لتجارب التداخل المتعلقة بإلكترونات أو فوتونات فردية هو الذي يُبين أننا كنا ننظر صراحة إلى أي إلكترون على أنه متموضع في المكان، ولكننا نفترض ضمناً أنه موجود باستمرار مع الزمن، أي أن الإلكترون ليس متموضعًا في الزمان.

لذا مرة أخرى، عندما أخذنا وجود الخطوط الكونية على محمل الجد وسألنا عما إذا كان جسم ما فيزيائي – إلكترون – هو خط كوني في

الزمكان، أخبرنا الدليل التجريبي الميكانيكي الكمومي أنه لا يمكن للإلكترون أن يكون خطًا كونيًا. فما هو إذًا؟ لعل أفضل طريقة لتصور إلكترون ما لا يكون خطًا كونيًا، وبالتالي لا يكون موجودًا باستمرار مع الزمن (ولكنه شيء ما أكيد في الزمكان)، هو أن نتخيل أن خطه الكوني يتفتت إلى النقط رباعية الأبعاد المكونة له.

تؤدي تلك الفرضية التي تهدف إلى بلوغ فكرة مذهب الذرية حدّ اكتمالها المنطقي – أي التفرد ليس فقط في المكان ولكن في الزمان أيضا: الذرية الرباعية(*) [١٥٧، ١٥٨]. نموذج الزمكان للإلكترون في هذه الحالة هو مجموعة من النقط (دعنا نسميها كوانتونات quantons) في الزمكان – وهي الخط الكوني 'المتفتت' للإلكترون (شكل ١٠,١). يمكن عندئذ تفسير تردد كومبتون للإلكترون بحيث يعني أن لكل ثانية واحدة يُمَثِّل إلكترون ما بواسطة $١٠^{٢٠}$ كوانتونًا. عندما لا يُقاس إلكترون ما فهو *في الواقع* في كل مكان في منطقة الزمكان، حيث تكون فيه دالته الموجية مختلفة عن الصفر، لأن مكوناته تُشَتَّت في جميع أنحاء تلك المنطقة. بمعنى آخر، لو أن إلكترونًا ما مقيد بغرفة، فسوف تكون الكوانتونات موزعة بانتظام في شريط الزمكان الكوني للغرفة كما هو مبين في شكل ١٠,٢. وعند عدم القياس سوف تنحصر الكوانتونات كلها في الغرفة بواسطة جدرانها.

(*) طُوِّرَت هذه الفكرة الجذرية في أوائل الثمانينيات بواسطة أناستاسوف Anastassov من جامعة صوفيا. ولكنها، مع الأسف، بقيت دون أن يلاحظها أحد حتى الآن.

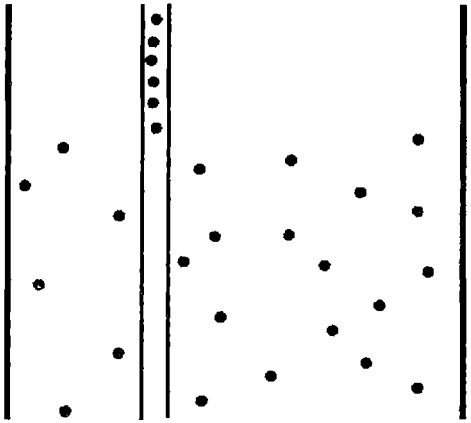


شكل ١٠,٢ (أ) إلكترون شبه نقطي موجود باستمرار مع الزمن ومحصور في غرفة تُمثّل بالخطين الكونيين لاثنين من جدرانها. أثنا فترة زمنية معينة (لنقل مثلاً، 1 s) لا يمكن لذلك الإلكترون، عندما لا يُقاس، أن يكون في كل مكان في الغرفة، يكون فيه احتمال العثور عليه مختلفاً عن صفر. (ب) يشغل إلكترون ما غير مستمر الوجود مع الزمن أثناء نفس الفترة الزمنية الحجم الكامل للغرفة

افترض الآن أن لدينا كاشفاً في الغرفة، وأننا نعتزم قياس الإلكترون عند موضع معين في الغرفة. نقوم بتشغيل الكاشف، وبعد مرور بعض الوقت يتم تسجيل الإلكترون، وبهذا يكون *متموضعًا* في الكاشف. السؤال الأكثر صعوبة يتعلق بما إذا كان الإلكترون عند النقطة التي يكون عندها الكاشف

قبل القياس. بما أن ميكانيكا الكم تخبرنا بأنه يمكننا العثور على الإلكترون باحتمال متساوٍ في الغرفة، فإنه لو كان الإلكترون في مكان الكاشف قبل تسجيله، لكانت ميكانيكا الكم في أحسن حالاتها نظرية غير مكتملة. دعنا نسأل أين كان الإلكترون قبل قياسه بثانية واحدة. إذا كان الإلكترون جسيمًا شبه نقطي موجودًا باستمرار مع الزمن، فلا يمكن للإلكترون أن يكون في كل مكان بالغرفة (حيث تكون فيه دالته الموجية مختلفة عن الصفر) أثناء تلك الثانية كما هو مبين في شكل ١٠,٢ أ. على رغم من ذلك، إذا كان الإلكترون ذرة رباعية وجودها الزمني غير مستمر كما هو مبين في شكل ١٠,٢ ب، فإنها تتكون لمدة ثانية واحدة من 10^{20} كوانتونًا تشغل ظاهريًا حجم الغرفة بالكامل أثناء ذلك الوقت. لذا، لو أن الإلكترون ليس موجودًا باستمرارية مع الزمن قبل قياسه، فيكون من الواضح سبب وجوده في كل مكان في الحجم الذي يكون فيه احتمال العثور عليه ليس صفرًا (وسبب استطاعته المرور من خلال كلا الشقين).

والآن، دعنا ننظر إلى الطريقة التي يُقاس بها إلكترون غير مستمر الوجود مع الزمن. الأنبوب الكوني للكاشف الذي قسنا بواسطته الإلكترون في الغرفة مبين في شكل ١٠,٣. بدلالة لغتنا ثلاثية الأبعاد، تقوم كوانتونات الإلكترون بالظهور والاختفاء باستمرار عند نقط مختلفة بالغرفة. إذًا يشغل الإلكترون بالفعل الحجم الكلي للغرفة قبل رصده. إذا وقع كوانتون في الكاشف فإنه يُحاصَر بواسطة جدران الكاشف (نتيجة قفزة في الشروط الحدودية) وستبدأ جميع الكوانتونات التالية في الظهور والاختفاء فقط في الكاشف مما يعني أن الإلكترون يصبح متموضعًا.



شكل ١٠,٣ يشغل إلكترون فردي في غرفة، قبل رصده، الحجم الكلي المتاح له. عندما يظهر الكوانتون الأول في الكاشف، يُحاصر هناك وتبدأ أيضًا جميع الكوانتونات اللاحقة في الظهور والاختفاء في الكاشف

إن فرضية مذهب الذرية الرباعية المعنية بطبيعة الجسم الكمومي تبين وسيلة لحل المفارقة الكمومية الرئيسية – دائمًا ما يُرصَد أي جسم كمومي ككيان متموضع، ولكنه يشغل، قبل الرصد، الحجم الكامل الذي لا تكون فيه دالته الموجية صفرًا. لكن الأهم هو أن هذه الفرضية توحي بأنه ربما تكون هناك صلة بين طبيعة الجسم الكمومي وطبيعة الزمكان. كما هو مبين في شكل ١٠,٣، تقوم الكوانتونات المُحاصرة في غرفة ما بالظهور والاختفاء عشوائيًا في الغرفة. بلغتنا العادية ثلاثية الأبعاد، يمكن فقط وصف هذا بدلالة الاحتمال. إلا أن جميع الكوانتونات الماضية، والحاضرة، والمستقبلية تكون *متساوية* الوجود في الزمكان. يمكننا احتماليًا فقط التنبؤ بظهور كوانتون عند مكان معين، ولكن وجود جميع الكوانتونات يكون محددًا مسبقًا بالكامل لأنها تُعطَى دفعة واحدة في الزمكان (والطبيعة 'تعلم' مواضع جميع كوانتونات

الإلكترون). لذا فإنه من زاوية رؤية الذريـــة الرباعيـــة، يكـــون الاحتمـــال الكمومي موضوعيًا، ولكن ليس بالمعنى الذي يكون فيه المستقبل مكشوفًا – جميع الكوانتونات التي تشكل إلكترونًا تكون موزعة احتماليًا في مساحة مـــا من الزمكان لا تكون فيها دالة الإلكترون الموجية صـــفرا، ولكنهـــا تكـــون جميعها متساوية الوجود. ولهذا فإن نموذج الذرية الرباعية للجسم الكمومي لا يقدم فقط حلاً للمفارقة الكمومية الرئيسية (وبضع مفارقات أخرى كما سنرى بعد قليل)، وإنما يقتضي أيضًا أن يكون الكون رباعي الأبعاد. إنها لنتيجـــة مدهشة للغاية. الرؤية العريضة القائمة هي أن الظواهر الاحتمالية الميكانيكية الكمومية تكون غير متوافقة مع صورة الكـــون الـــساكنة رباعيـــة الأبعـــاد المستنتجة من النسبية. ولكن إذا اتضح أن نموذجًا ما للجسم الكمومي الـــذي يقوم بحل مفارقات ازدواجية الموجة والجسيم متفق مع كل مـــن صـــورتي الكون الميكانيكية الكمومية والنسبوية (بل يوفر دعمًا أكثر لواقعية الزمكان)، فإنه يستحق إذًا اهتمامًا متأنيًا وتدقيقًا.

يجب التشديد على أنه سواء سيتم التأكيد التجريبي أم لا لفرضية مذهب الذرية الرباعية، فإن هذا لا يمثل حقًا أهمية لقضية طبيعة الزمكـــان، لكنـــه يوضح أنه ليس من غير الوارد أن يكون لدينا كلاهمـــا – زمكـــان واقعـــي وسلوك احتمالي للأجسام الكمومية. من الناحية الأخرى، على الـــرغم مـــن ذلك، يكشف تحليل شامل للمفارقات الكمومية أنه، لحلها، ينبغي فهم طبيعـــة الجسم الكمومي، ويبدو أن نموذجه الزمكاني الأكثر احتمـــالاً هـــو منظـــور الذرية الرباعية (لأنه من الواضح تقريبًا أن الافتراض الضمني لاســـتمرار وجود الأجسام الكمومية مع الزمن يسبب المفارقات). ها هي عـــدة أســـباب لذلك التوقع.

لا تزال هناك ادعاءات في جميع ما كتب في هذا الموضوع بأن ميكانيكا الكم تصف مجموعة من الأجسام الكمومية، ولكن لا يمكن تطبيقها على إلكترون فردي، مثلاً. ربما يتم توضيح عدم صحة هذه الرؤية بصورة أفضل، وذلك كما رأينا في تجربة الشق الزدوج عندما انبعثت الإلكترونات *الفردية* كل بدوره. تؤكد الإلكترونات المنفردة تنبؤات ميكانيكا الكم ولكن يظل هناك لغز السبب في سريان قوانين الكم الاحتمالية على إلكترون فردي. يوفر منظور الذرية الرباعية تفسيرًا دقيقًا – الإلكترون في حد ذاته هو مجموعة من الكيانات وعدد $١٠^{٢٠}$ كوانتونًا لكل ثانية واحدة هو مجموعة جيدة للغاية.

يوفر منظور الذرية الرباعية أيضًا تفسيرًا متسقًا لانهيار الدالة الموجية. في ضوء تلك الرؤية يمثل انهيار الدالة الموجية انهيارًا واقعيًا للجسم الكمومي كما هو مبين في شكل ١٠,٣ – بعد اللحظة التي يظهر عندها أول كوانتون في الكاشف ويُحاصَر هناك، وتظهر جميع الكوانتونات اللاحقة أيضًا في الكاشف؛ بمعنى، أن الإلكترون انهار داخل الكاشف لأن كوانتوناته توقفت فجأه عن الظهورفي الغرفة خارج الكاشف. إلا أنه لا يوجد تناقض مع النسبية الخاصة لعدم وجود تدخل لسرعات فائقة الضيائية (لو كان الإلكترون المنهار جسمًا شبه مائع، لكان هناك ذلك التناقض مع النسبية). وبرغم ذلك، لا يكون الانهيار الواقعي لامتغير لورنتز. هذا كاف لأن يرفض البعض أي نموذج للجسم الكمومي يتدخل فيه انهيار واقعي. قد لا يُبَرر ذلك التفاعل لأن الإلكترون سيكون مسجلاً بواسطة الكاشف في جميع أطر الإسناد التي تكون في حالة حركة نسبية. صحيح أنه في بعض أطر الإسناد المتحركة بالنسبة إلى الكاشف، ستكون بعض كوانتونات الإلكترونات موجودة بالتزامن مع رصد الإلكترون (الكوانتون الأول المُحاصر في الكاشف)، ولكن

تلك الكوانتونات لا يمكن قياسها، لأنها تنتمي إلى الإلكترون الذي تم رصده بالفعل. لذا فإنه بالنسبة لما يمكن قياسه من حيث المبدأ لا يوجد تناقض مع متطلبات لامتغير لورنتز. هذا الوضع يماثل الوضع المتعلق بالجسيمات الافتراضية. لا يمكن ملاحظة تلك الجسيمات مباشرة لأنها لا يمكن أن تكون الناتج النهائي لأي عملية، ولكن يُستنتج وجودها من تدخلها في العمليات الفيزيائية. بالمثل، قد تتواجد بعض الكوانتونات لحظيًا مع رصد الإلكترون في بعض أطر الاسناد، ولكن لا يمكن رصدها منفردة في أي إطار مرجعي آخر.

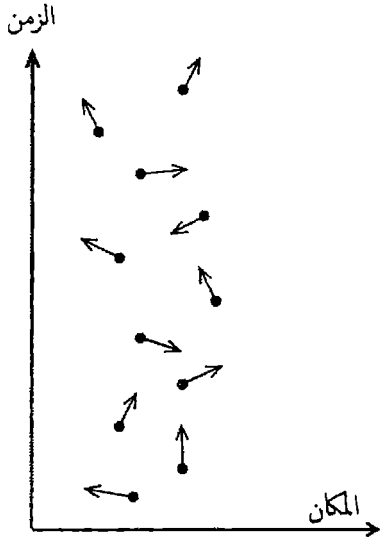
مصدر آخر للمفارقات الكمومية هو ما يسمى التشابك الكمومي – وفيه تبدو الأجسام الكمومية متصلة *لحظيًا* حتى بعد أن تتآثر وتنفصل. من منظور الذرية الرباعية يكون لهذه المسألة علاقة بسؤال تحول الجسيمات. لو اتضح أن الكوانتونات المشحونة على نحو مختلف هي أحجار البناء لجميع المواد، إذًا يكون كل جسم كمومي، حتى تلك الأجسام التي تعد غير قابلة للانقسام(*) مثل الإلكترون، مكونًا من تركيبة مختلفة (لها تردد كومبتون مختلف) من الكوانتونات. وعندما يتحول جسيم إلى جسيمات أخرى تنقسم المجموعة الأولية من الكوانتونات إلى مجموعات فرعية. قد تستمر كوانتونات هذه المجموعات الفرعية في التصرف كجزء من المجموعة الابتدائية التي ستُلاحَظ كرابطة لحظية بين الجسيمات المنْتَجَة.

(*) الحديث عن جسيمات ذات مكونات غير قابلة للانقسام يبدو أنه حالة واضحة من تناقض في المعنى. نأمل أن يكون القارئ قد اعتاد على توخي الحذر، وخاصة مع مثل هذه 'الحالات واضحة المعالم' – ما يبدو واضحًا للغاية أنه خطأ أو صواب قد لا يكون كذلك في الواقع في تحاليل علمية. الشيء الأصلي على نحو واعد في فرضية الذرية الرباعية هو نهجها الجذري لطريقة فهمنا لبنيان كائن ما. أما الفهم الحالي فهو أن أي جسم يمكن أن يكون له بنيان في المكان فقط. يوحي نموذج الذرية الرباعية للجسم الكمومي بأن أي جسم يمكن أن يكون غير قابل للانقسام (ليس له بنيان) في المكان (مثل الإلكترون) ولكن له بنيان في الزمان أو بالأحرى في الزمكان.

دعوني أناقش باختصار كيف تبدو المفارقات الكمومية الأخرى – وجود مستويات طاقة متراكبة ومفارقة قطة شرودنجر – وذلك طبقًا لمنظور الذرية الرباعية. بدون نموذج للجسم الكمومي، يكون من المستحيل فهم كيفية وجود مستويات طاقة متراكبة في ميكانيكا الكم. فمثلاً، عندما يكون إلكترون ما في مجال مغنطيسي رأسي خارجي وغير مُقاس، فإنه في حالتي تراكب من لفّ أو تدويم لأعلى وتدويم لأسفل. ليس من الواضح كيف يمكن للإلكترون أن يكون موجودًا في كلتا الحالتين. إن نموذج الذرية الرباعية ليس لديه أي مشكلة مع مستويات الطاقة المتراكبة – كما هو مبين في شكل ٤,١٠، يكون لتدويم كل كوانتون لإلكترون ليس في مجال مغنطيسي اتجاه مختلف. لأي فترة زمنية حتى الآن يكون الإلكترون بالفعل في مستوى طاقة متراكب من تدويمات مختلفة. عندما يكون الإلكترون في مجال مغنطيسي رأسي، تكون تدويمات نصف كوانتوناته مشيرة لأعلى والنصف الآخر مشيرة لأسفل.

في مفارقة قطة شرودنجر، توضع ذرة مُشعة بالقرب من كاشف. عندما تضمحل الذرة، يُقاس إلكترون منبعث بواسطة الكاشف. يحرك التيار الكهربي الناتج مطرقة فتكسر زجاجة تحوي غازًا سامًا. الزجاجة في صندوق مغلق مع قطة. إذا كانت الذرة سليمة فإن الزجاجة لا تنكسر وتكون القطة على قيد الحياة. ولكن، عندما تضمحل الذرة، يبدأ إلكترون منبعث تفاعلاً متسلسلاً ينتج عنه وفاة القطة. طبقًا لميكانيكا الكم إذا كان لدينا ذرة وحيدة لها عمر نصف ساعة واحدة، فأثناء تلك الساعة سيكون الجسم الكمومي في حالة تراكب – يكون سليمًا ومضمحلاً في آن واحد. إذًا، الكاشف والمطرقة والزجاجة والقطة ستكون جميعها في حالات متراكبة إذا لم نفتح الصندوق أثناء هذه الساعة. إن فتح الصندوق سوف يدمر الحالات المتراكبة. يوفر نموذج الذرية الرباعية للجسم الكمومي أيضًا حلاً طبيعيًا لمفارقة قطة شرودينجر. إن كوانتونات الإلكترون المنبعثة نتيجة اضمحلال

الذرة المشعّة تظهر وتختفي عشوائيًا داخل وخارج الذرة خلال الساعة. ولهذا تكون الذرة مضمحلة وسليمة في آن واحد خلال هذا الوقت. على رغم من ذلك، لا توجد كوانتونات تظهر وتختفي في الكاشف لأنه إذا وقع كوانتون واحد هناك، فإن الإلكترون سوف يُسَجّل. هذا يعني أنه، في ضوء فرضية الذرية الرباعية، لا يمكن للكاشف أن يكون في حالة تراكب. وبالتالي، فإن المطرقة والزجاجة والقطة لا يمكنها أن تكون في تلك الحالة أيضًا. طبقًا لفرضية الذرية الرباعية، عندما يظهر الكوانتون الأول في الكاشف، فإنه يكون مُحاصرًا هناك، وتنهدم الحالة المتراكبة للذرة المضمحلة، وتبدأ جميع الكوانتونات اللاحقة للإلكترون في الظهور والاختفاء فقط في الكاشف. عندما يُسَجّل الإلكترون، لا يمكن أن تكون المطرقة والزجاجة والقطة في حالات متراكبة، وهو ما يعني تحرر القطة من كونها حية وميتة في آن واحد.



شكل ١٠,٤ عندما لا يكون الإلكترون مرصودًا يكون مُمَثّلاً لثانية واحدة بـ $١٠^{٢٠}$ كوانتونًا، التي تتخذ تدويماتها اتجاهات عشوائية. وبالتالي يكون للإلكترون بالفعل أثناء هذه الثانية جميع اتجهات التدويم الممكنة

١٠,٣ ملخص

وضحنا في هذا الفصل أن سؤال واقعية الزمكان والخطوط الكونية قد يعطي بعض التبصر في طبيعة الأجسام الكمومية. من ناحية، يتحتم أن يكون أي جسم كمومي، إلكترون مثلاً، شيئًا في الزمكان. ومن الناحية الأخرى، يخبرنا الدليل التجريبي الميكانيكي الكمومي بوضوح، مثل تجارب التداخل باستخدام إلكترونات فردية، أن الإلكترون لا يمكنه أن يكون خطًا كونيًا. يبدو أن نموذج الإلكترون الزمكاني الوحيد الممكن هو بالنظر إليه على أنه نقط خطه الكوني المتفتت (منظور الذرية الرباعية).

قمنا بتحليل هذا النموذج الزمكاني لفكرة الذرية الرباعية للجسم الكمومي، ووجدنا أنه يعالج بطبيعة الحال المفارقات الكمومية. والأهم، على الرغم من ذلك، أنه يوضح أن الحصول على كلا الاحتمالين الزمكاني الواقعي والكمومي الموضوعي أمر غير وارد. النتيجة التي قمنا باستخلاصها تشير إلى أنه ربما تكون هناك صلة بين نموذج زمكاني للجسم الكمومي (يقوم بحل المفارقات الكمومية) وبين بعدية الكون. لذا فإن ما يتوقعه الشخص لميكانيكا الكم ليس فقط أنها لا تناقض بالفعل منظور البعدية الرباعية، ولكنها توفر حجة مستقلة في تأييدها.

ملحق أ

حجج ميكانيكية كمومية ضد واقعية الزمكان

إحدى طرق تجنب التحديات التي تطرحها النسبية الخاصة هو التشكيك ضمنيًا في صحتها.(*) عادة ما يتم ذلك بالإشارة إلى أن النسبية الخاصة لا تحكي قصة الكون كاملة، ولهذا ينبغي عدم أخذ حجج واقعية الزمكان المعتمدة عليها بجدية. ثم يُشار إلى أن هناك نظريات أكثر حداثة، مثل النسبية العامة، وميكانيكا الكم، والجاذبية الكمومية، ونظرية الأوتار، إلى آخره، يكون السؤال فيها عن طبيعة الزمكان ذا إجابة مختلفة.

مثل هذه الادعاءات تصل إلى التشكيك في أصل صحة النسبية الخاصة. كما رأينا في الفصلين الرابع والخامس، الحجج المؤيدة لواقعية الزمكان عبارة عن نتائج للنسبية الخاصة. لذا، فإن القول بأن النسبية الخاصة لا تكشف عن الحقيقة الكاملة حول الجزء الذي تصفه من الكون، وهو ما يعني في هذا السياق الحقيقة الكاملة حول طبيعة الزمكان (أيْ الحقيقة حول بُعْدِيَّة الكون على المقياس الماكروي)، يصل إلى حد التشكيك في النظرية

(*) المحاولات التي لا تزال موجودة للتشكيك صراحة في النسبية الخاصة لن يتم مناقشتها هنا. مع الأسف، أخفق مؤلفوها حتى الآن في الاعتراف بأحد أهم الدروس الثمينة في تاريخ العلم – وهو أن العلم لا يرجع أبدًا إلى الخلف. أحد أهداف هذا الكتاب هو إظهار أن النسبية في نهاية المطاف ليست فقط صحيحة حتمًا، ولكن إثبات خطئها لن يتم أبدًا في نطاق قابليتها للتطبيق، كما سنرى في الفصل القادم.

نفسها. قد يوجد من يعترض، قبل فعل ذلك، على أنه من الطبيعي توضيح أن نتائج النسبية الخاصة يمكن تفسيرها في إطار فكرة البُعْدِيَّة الثلاثيـــة . هـــذا صحيح، ولكن كلما يلجأ الشخص إلى حجة النظريات الحديثة، يكون ذلك فقط عندما يخفق في كل محاولة تهدف إلى بيان أن تفسير الزمكان لنتائج النسبية الخاصة ليس هو التفسير الوحيد.

أفضل طريقة لفهم سبب فشل حجة النظريات الحديثة تكون بـــالرجوع إلى التحليل الذي تم إجراؤه في الفصلين الخامس والسادس – وهو أنه ليست فقط نتائج النسبية (كنتائج نظرية) هي التي تكون مستحيلة لو كـــان الكـــون ثلاثي الأبعاد (أيْ لو كان الزمكان غير واقعي)؛ وإنما الدليل التجريبي نفسه، الذي يؤكد تلك النتائج، هو الذي قد يكون مستحيلاً لو لم يكن الكون ربـــاعي الأبعاد. لذا فإن الحجج المؤيدة لواقعية الزمكان تعتبر أكثر قوة، لأنها مشتقة مباشرة من التجارب التي أكدت نتائج النسبية الخاصة.(*) لهذا فإن الهجـــوم الوحيد المناسب ضد تلك الحجج يتمثل في محاولة إثبات أن الدليل التجريبي الذي يؤكد النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة يمكن تفسيره (ولـــيس مجـــرد وصفه) بدلالة منظور البُعْدِيَّة الثلاثية .

يبدو أن أولئك الذين يدفعون بحجج النظريات الحديثة مقتنعون بأن أي نظرية تأتي بعد النسبية الخاصة قد توفر طريقـــة جديـــدة لتفـــسير الـــدليل التجريبي. مثل ذلك التوقع ليس له أي مبرر. دعنا نبدأ بالنسبية العامة، لأنها كانت أول نظرية أتت بعد النسبية الخاصة. إن تحليلاً للنسبية العامـــة كهـــذا الذي تم إجراؤه في الفصل الخامس لا يكتفي فقط بعدم التشكيك فـــي حجـــج واقعية الزمكان المشتقة من النسبية الخاصة، بل إنه يوفر حججًا جديـــدة. إن

(*) استرجع بداية كلمة مينكوفسكي في عام ١٩٠٨ [١١]: "إن رؤيتيْ المكان والزمان اللتـــين أود أن أضعهما أمامكم قد انبثقتا من تربة الفيزياء التجريبية، وهنا تكمن قوتهما."

النتائج الكينماتيكية للنسبية الخاصة – نسبية التزامن، تقلّص الطول، تمدد الزمن، ومفارقة التوأمين – تعتبر سارية في النسبية العامة أيضًا، ولها التفسير نفسه. أيضًا، يوضح تحليل التأثيرات النسبوية العامة الحقيقية أن هذه التأثيرات ليست فقط مظاهر تأييد لكون واقعي رباعي الأبعاد، ولكن لكون منحنٍ رباعي الأبعاد.(*) فعلى سبيل المثال، يمكن تفسير الانزياح الأحمر الثقالي فقط إذا كان الزمكان واقعيًا، مما يجعل من الممكن أن يكون لدى مراقبين في مكانين مختلفين في مجال ثقالي زمنان حقيقيان مختلفان.

ولأن الجاذبية الكمومية ونظرية الأوتار ليستا نظريتين مؤكدتين، دعنا نرى ما إذا كان يمكن لميكانيكا الكم أن يكون لها أي تأثير على النقاش حول طبيعة الزمكان.

الفكرة الأساسية بأن ميكانيكا الكم قد تؤثر على النقاش حول طبيعة الزمكان هي كالتالي. بما أن النسبية الخاصة نظرية كلاسيكية (ليست كمومية)، فإن أحيانًا ما ينظر لمفهوم الزمكان على أنه تصور متطرف من الحتمية الصارمة للفيزياء النيوتونية – تُعرف تواريخ جميع الأجسام من خطوطها الكونية، وبهذا المعنى تكون محددة تمامًا. إن ميكانيكا الكم، من الناحية الأخرى، هي نظرية احتمالية – مفادها أنه لا يمكن التنبؤ بتواريخ الأجسام الكمومية بيقين. وبذلك، حيث يبدأ الجدل، يكون الكون احتماليًا فلا ينبغي على الشخص أن يشغل باله بتضمينات نظرية كلاسيكية (ليست كمومية) مثل النسبية الخاصة.

(*) يبين تحليل كهذا أن الحجج العامة التالية تكون سارية. تبين الحقيقة الراسخة التي تقضي بأنه، في النسبية العامة، تكون الثقالة مظهرًا لانحناء الزمكان أن النسبية العامة تفترض مسبقًا واقعية الزمكان؛ وإلا كيف لشيء غير موجود أن يكون منحنيًا؟

إن هذه الحجة خاطئة لسببين على الأقل. بما أن ميكانيكا الكم لا تتنبأ بالتأثيرات النسبوية، فإنها لا تحتوي حتى على احتمال لأي تفسير جديد للدليل التجريبي المؤكد لها. إن الحجة الميكانيكية الكمومية معتمدة أيضًا على مفهوم خاطيء متعلق بالزمكان. لقد رأينا أن التأثيرات النسبوية ممكنة لو كان الزمكان واقعي، ولكن واقعية الخطوط الكونية للأجسام لا تقتضي ضمنًا بأي حال إمكانية التنبؤ بالتواريخ المستقبلية لهذه الأجسام بيقين مطلق.(*) يبين هذا أن واقعية الخطوط الكونية للأجسام، بالإضافة إلى قضية ما إذا كان التنبؤ بالتواريخ المستقبلية لهذه الأجسام حتميًا أم احتماليًا، هما قضيتان مختلفتان. رأينا هذا في الفصل العاشر.

إن انعدام صلة الحجة الميكانيكية الكمومية بالمناقشة حول طبيعة الزمكان ربما يظهر على أفضل صورة من حقيقة أنك تستطيع قراءة هذا النص. معادلات الحركة لميكانيكا الكم تحكم سلوك الأجسام الكمومية على المستوى الميكروي، حيث تعيش الإلكترونات، والبروتونات، والنيوترونات، والذرات، إلى آخره. كل هذه الكيانات تتصرف طبقًا لقوانين الاحتمالات لميكانيكا الكم. على الرغم من ذلك، عندما تُطَبَّق معادلات الحركة لميكانيكا الكم على المستوى الماكروي، فطبقًا لمبدأ بور للتناظر، ينبغي أن تتطابق مع معادلات الحركة الكلاسيكية. يعني ذلك في حالة الزمكان أنه مهما تصرفت مكونات الخط الكوني لجسم معين – حتميًا أو احتماليًا – فلن تؤثر في شكل الخط الكوني. لتصوير هذا الوضع بصورة أفضل، اعتبر حروف النص الذي

(*) عندما نحل معادلات الحركة الكلاسيكية (النيوتونية أو النسبوية)، نستخدم شروطًا ابتدائية معينة ينبغي تعيينها تجريبيًا. أيُّ شك في الظروف الابتدائية يؤدي إلى شكوك أعظم في تنبؤ الحالات المستقبلية للأجسام.

تقرأه الآن. كل حرف يتكون من عدد كبير من جزيئات الحبر. ويحتوي كل جزيء حبر على بلايين الإلكترونات، والبروتونات، إلى آخره، التي يكـــون سلوكها احتماليًا. لو كانت الطبيعة الاحتمالية لميكانيكا الكـــم ظـــاهرة علـــى المستوى الماكروي أيضًا (مستوى الحروف على هذه الصفحة)، لكانت جميع الحروف تتصرف هي أيضًا بطريقة احتمالية – تستمر في تغيير شكلها وتقفز هنا وهناك.

ملحق ب

طبيعة الزمكان وصحة النظريات العلمية

عادة عندما تفشل جميع الحجج المعارضة لواقعية الزمكان، يكون الملاذ الأخير هو موثوقية المعرفة العلمية. تأتي هذه الحجة في شكلين. الأول هو الاعتراض الفلسفي القديم ضد موثوقية جميع أنواع المعرفة. تعتمد معرفتنا غالبًا على الاستدلال الاستقرائي، ولكن بما أن هذا النوع من الاستدلال لا يكون موثوقًا مثل الاستدلال الاستنباطي، فإنه لا يمكننا أن نكون على يقين بما نعلمه.(*) تُعرف هذه المشكلة الفلسفية بمشكلة (تبرير) الاستقراء لهيوم – Hume's problem of (justification of) induction. الحجة الثانية المعارضة لواقعية الزمكان مشتقة من الرؤية المنتشرة على نطاق واسع لصحة النظريات العلمية المعتمدة على حجج بوبر Popper بأن أي نظرية يمكن فقط دحضها؛ ولا يمكن إثباتها.

(*) دائمًا ما يثمر الاستنتاج الاستنباطي نتيجة حقيقية، بشرط أن تكون المقدمات المبني عليها حقيقية. هذا لأننا، في حالة الاستنتاج الاستنباطي، نقوم باستنباط تقرير عن مثال لظاهرة معينة على أساس معلومات عن الظاهرة ككل؛ بمعنى آخر، في الاستدلال الاستنباطي، تؤدي المقدمات إلى النتيجة. ومع ذلك، فإن الاستنتاج الاستقرائي يؤيد ولكن دون أن يضمن، صحة النتيجة، لأن هذا النوع من الاستنتاج يعمم المعرفة التي تم الحصول عليها من عدد معين من الحالات المفحوصة لظاهرة ما على حالات لم تفحص بعد للظاهرة نفسها.

يبدو للوهلة الأولى أنه لا ينبغي على المرء أن يشغل باله بتلك الحجج الفلسفية لأن *الدليل التجريبي* هو ما يدعم منظور البُعْدِيّة الرباعية. لذا سواء كان من الممكن تبرير الاستنتاجات الاستقرائية أم لا، أو سواء كانت النسبية الخاصة سوف يتم دحضها في يوم من الأيام أم لا، كل هذا يبدو في غير محلّه. وعلى رغم من ذلك، فإن رفض تلك الحجج دون محاولة فهم وجهة النظر التي يرغب مؤلفوها في توضيحها قد لا يعد أمرًا مهنيًا ولا عادلاً.

ونسوق مثالاً محددًا على حجة موثوقية المعرفة العلمية وهو أن النسبية الخاصة لا تحتوي على معرفة مطلقة، ولهذا سوف تُستبدل في يوم ما بنظرية أخرى أكثر ملاءمة. ربما توفر تلك النظرية تفسيرًا مختلفًا للتجارب التي تؤكد التأثيرات النسبوية التي يمكن تفسيرها الآن فقط في إطار منظور البُعْدِيّة الرباعية. سوف نعالج هنا كلا الطرحيْن لحجة موثوقية المعرفة، ونبرهن أن لدينا أسبابًا جيدة للاعتقاد في الصلاحية غير المُزَعزعة للنظريات العلمية في النطاقات الخاضعة لتطبيقها .

ب.١ موثوقية المعرفة: استقراء في صورة استنباط خفي

المشكلة الأولى التي نواجهها عندما نبدأ في الاستدلال حول صلاحية نظريات علمية هي مشكلة هيوم – كيف نُبرر الاستنتاج الاستقرائي. وبما أن النظريات مبنية على مسلمات 'مستخلصة' من الملاحظات التجريبية بمساعدة الاستدلال الاستقرائي، فمن الطبيعي الانشغال بما إذا كانت الاستنتاجات الاستقرائية يمكن الوثوق بها. إن ما يعطينا الثقة في الاستقراء هو حقيقة أن جميع النظريات العلمية تتبع متطلبات المنهج الفرضي الاستنباطي:

- استخدام الحقائق التجريبية والاستدلال الاستقرائي لصياغة مسلمات (فرضيات)(*)،
- استنتاج تنبؤات منها.
- العودة إلى التجربة لاختبار التنبؤات المستنتجة من المسلمات.

في كل مرة تؤكد فيها التجربة تنبؤاً معيناً، يزداد إيماننا بالمسلمات، ولكن ليس من المستحيل اكتشاف حقيقة تجريبية تناقضها. إذا حدث ذلك فلن يكون لدينا خيار إلا إعادة الفحص واستبدال المسلمة (أو المسلمات) المُتَناقَضة في نهاية الأمر. وبما أن المسلمات عبارة عن استنتاجات استقرائية، فإن مثل تلك الحالات بالضبط هي التي تنشأ فيها قضية تبرير الاستقراء.(**)

لقد كانت هناك محاولات عديدة منذ طرحت مشكلة هيوم لتبرير الاستقراء، ولكن يبدو أن هناك احتمالاً واحدًا لم يتطرق إليه أحد أبدًا. سوف أُثبت هنا بإيجاز أنه، في النهاية، ربما يتضح لنا أن الاستقراء هو *استنباط* خفي، وهو ما يمكن أن يفسر السبب في أن جميع التقارير المعتمدة على استدلال استقرائي صائب لم نجدها أبدًا خاطئة.

أولاً، دعوني أفسر ما الذي أقصده باستنتاج استقرائي صائب. يغلي الماء عند مستوى سطح البحر عند درجة حرارة 100°C، وهنا يبدو طبيعيًا

(*) المسلمات postulates قضايا ليست بديهية بذاتها axioms، ولا يستطاع البرهنة عليها، ومع ذلك يسلم بها، ويمكن أن يستخلص منها نتائج لا يرفضها العقل. راجع المعجم الفلسفي، مجمع اللغة العربية بالقاهرة، ١٩٨٣م [المترجم]

(**) هذا الوصف المختصر للمنهج الفرضي الاستنباطي يمثل، بالطبع، حالة مثالية. ولكن يكفي توضيح المشكلة باستنتاجات استقرائية.

تعميم هذا الجزء من المعرفة استقرائيًا على كل حالات غليان الماء التي لم تفحص بأن نقول إنه يغلي عند 100°C. ولكن على قمة جبل إفريست، مثلاً، يغلي الماء عند درجة حرارة أقل وقد يميل المرء إلى القول بأن هذا مثال ممتاز على كيفية فشل الاستقراء. لكن من الواضح أن ذلك الاستنتاج الاستقرائي خاطئ، لأن الظروف (مثلاً، الضغط الجوي) عند سطح البحر وفوق قمة جبل إفريست ليست واحدة. بالمثل، عندما نقول إن جميع الغربان التي لاحظناها كانت سوداء وبالتالي فإن جميع الغربان سوداء، فإننا نفشل مرة أخرى في تطبيق الاستدلال الاستقرائي بصورة صائبة. وكما في المثال الأول، الظروف المتعلقة بملاحظة غراب أسود وغراب أبيض، مثلاً، ليست واحدة – المادة الوراثية ليست واحدة لغراب أسود وآخر أبيض. على حد علمي، لم يلاحظ أبدًا من قبل ظهور أي حالة فشل لاستنتاج استقرائي سليم.

قلّمَا يشكك أي أحد في موثوقية معرفتنا التي حُصل عليها أساسًا باستدلال استقرائي.(*) إن السؤال الجوهري هو لماذا يثمر الاستدلال الاستقرائي نتائج حقيقية. لوضع ملامح إجابة لهذا السؤال اعتبر الاستنتاج الاستقرائي التالي: "بما أن البشر الذين عاشوا حتى الآن قد ماتوا، فإن جميع البشر فانون"، وهي الحقيقة التي لا يشك فيها أحد. معرفتنا بالسبب في أن البشر فانون تكشف عن أن الفناء هو إحدى السمات الداخلية التي تُعرِّف الإنسان؛ لذلك فإن الفناء متضمَّن في تعريف الإنسان. ولهذا، عندما نقول 'إن جميع البشر فانون'، فإننا نستخدم الاستدلال *الاستنباطي*، لأن تعريف الإنسان يؤدي إلى استخلاص نتيجة أن كل كائن ينطبق عليه هذا التعريف يكون فان.

(*) حتى الذين يمثلون التشكيك الفلسفي المتطرف يثقون في الاستدلال الاستقرائي – فهم مثلاً، يأخذون مظلتهم إذا كان الجو ماطرًا في الخارج.

بعد أن تكون لدينا معرفة شاملة عن الصفات الأساسية لجسم أو ظاهرة ما حصلنا عليها من خلال دراسة أعداد محددة من الأجسام أو الظواهر من الفئة نفسها، عندما ندّعي أن جميع الأجسام أو الظواهر من تلك الفئة تمتلك تلك الصفات الأساسية، فإننا بذلك لا نطبق الاستنتاج الاستقرائي. إن الاستنتاج الاستنباطي هو أن تمتلك جميع الأجسام من فئة معينة السمات المتضَمَّنَة في تعريف الأجسام من تلك الفئة. مثلاً، التوصيل الكهربي صفة داخلية للفلزات وبالتالي تكون متَضَمَّنة في تعريف الفلز.(*) لهذا فإن نتيجة 'جميع الفلزات توصل الكهرباء' من الواضح أنها مشتقة عن طريق استدلال إستنباطي، لأن كل فلز، طبقًا للتعريف، يوصل الكهرباء. من الناحية الأخرى، لا يمكننا قول إن جميع الغربان سوداء لأننا نعلم من علم الوراثة أن السواد ليس صفة داخلية للغربان.

عندما نحصل على معرفة كافية بصفة داخلية لفئة من الأجسام أو الظواهر، يصبح من الواضح لماذا ينجح الاستقراء ولماذا يبدو أنه يفشل. لو فشلت حالة معينة من الاستدلال الاستقرائي، فسنجد بعد فحص أدق أنها قد طُبقت بصورة غير سليمة على حالات ليست متساوية من جميع النواحي مع الحالات المفحوصة على الأساس الذي تم به الاستنتاج الاستقرائي. في جميع الحالات التي تم فيها التأكيد التجريبي لاستنتاج استقرائي ظاهر (مثلاً، قياس

(*) ها هو تعريف نموذجي للفلز من موسوعة فيزياء [١٥٩]: "الخواص التي تميز فلزًا ما في الأساس هي موصليته الكهربية والحرارية العالية، وقابليته للسحب والطرق، ولمعانه. هذه الخواص قد تستنتج جزئيًا من نوعية الربط التي تميز الفلز." وعلى حد تعلق الأمر بالموصلية الكهربية، فإنها تستنتج على نحو تام من التركيب الذري للفلزات، الذي يبين أن الموصلية الكهربية هي بالفعل صفة مُعَرِّفة لجميع الفلزات. إن الفيصل هو إدراك أن معرفتنا عن التركيب الذري لا تتم بالاستقراء. من الواضح أننا لا نقوم بفحص التركيب الذري لمئات الذرات ونعمم المعرفة التي حصلنا عليها على جميع الذرات.

الموصلية الكهربية لقطعة من فلز غير مفحوصة)، يتضح أنها استدلال استنباطي خفي.(*) لذا فإن ما يبدو على أنه استدلال استقرائي يكون موثوقًا لأنه في الواقع استدلال استنباطي لا يمكن أن يؤدي إلى نتيجة خاطئة بشرط أن تكون المقدمات صحيحة.

صحيح أن مسلمات نظرية ما تصاغ على أساس استدلال استقرائي. المثال على ذلك هي مباديء نيوتن الثلاثة. كما سنرى في القسم التالي، سوف تظل صائبة للأبد في النطاق الذي تم فيه تأكيد تنبؤاتها تجريبيًا. إذا مرة أخرى، السؤال هو لماذا تثمر دائمًا الاستنتاجات الاستقرائية الصائبة نتائج موثوقة؟ الإجابة هي ذاتها – جميع الاستنتاجات الاستقرائية الصائبة تثبت في النهاية أنها حالات استنباط خفي. في حالة مبادئ نيوتن الثلاثة (ومسلمات جميع النظريات العلمية المقبولة)، حدث أن الصفات الذاتية للأجسام الفيزيائية تم *تخمينها* على نحو صحيح. إلا أن مثل ذلك التخمين ليس استقراءً. إن الاستدلال الاستقرائي يعني فقط بتعميم ما تمت ملاحظته في جميع الحالات المفحوصة لظاهرة ما على جميع الحالات التي لم تفحص. لا تُجرَى أي محاولات لفهم الصفات الداخلية (المُعَرِّفة) لتلك الظاهرة. وعلى النقيض، تحاول أي مسلمة لنظرية علمية أن تقتنص الصفات الأكثر جوهرية للظواهر التي تصفها النظرية. وفي زمن لاحق، عندما يكون قد تم دراسة الظواهر بالكامل، يتضح بالفعل أن مسلمات تلك النظرية تقر فقط الخواص

(*) قد يعترض البعض على هذه النتيجة، وربما يجادلون في أننا نصل إلى الخصائص الأساسية لجسم (لنقل مثلاً، فلز) من خلال الاستقراء. ليس هذا هو الحال، لأننا نعلم عن هذه الخصائص، ليس بواسطة فحص عينات مختلفة لذلك الجسم، وإنما بواسطة دراسة تركيب الجسم. بالمثل، عندما نقول إن الفناء مُتَضَمَّن في التعريف لإنسان ما فربما يثار جدل حول أننا وصلنا إلى تلك النتيجة بواسطة الاستقراء. كان من الممكن تقديم تلك الحجة بقوة في القرن التاسع عشر. ولكن تضمين الفناء في تعريف الإنسان الآن لا يعتمد على الاستقراء، وإنما على أحدث الإنجازات في علم الوراثة.

الأساسية لتلك الظواهر. لهذا فإن تطبيق مسلمات النظرية على الحالات التي لم تفحص بعد للظواهر نفسها يكون ناجحًا دائمًا. ذلك التطبيق هو ببساطة استنتاج استنباطي – بما أن الحالات التي لم تفحص عبارة عن مظاهر لنفس الظواهر، فينبغي أن تبدو تمامًا مثل الحالات المفحوصة بالفعل. نجح نيوتن في أن يعكس جميع الخواص الداخلية للأجسام الفيزيائية (فيما عدا الجاذبية) في مبادئه الثلاثة. يفسر هذا السبب في أن جميع الأجسام التي لم تفحص تتصرف طبقًا لمبادئه، بصرف النظر عن مكان وجودها في الكون. إن تطبيق مباديء نيوتن هو استنباط بالفعل – بما أن القصور الذاتي هو أحد الصفات المُعَرِّفة لجسم فيزيائي، فإنه يجب على جميع الأجسام الفيزيائية التي لم تفحص بعد أن تمتلك خاصية القصور الذاتي، مما يعني أنه:

- ينبغي عليها التحرك من تلقاء نفسها إذا لم يمنعها شيء من فعل ذلك (مبدأ نيوتن الأول).

- ينبغي عليها المقاومة عندما يحاول شيء ما أن يثنيها عن الحركة بالقصور الذاتي (مبدأ نيوتن الثاني).

- القوة المُقاومة (القصورية) تساوي القوة الخارجية التي تسببت في القوة المُقاوِمة (مبدأ نيوتن الثالث).

تبدو النسبية الخاصة الآن بأنها قد زودتنا بمعرفة كافية عن الأساسيات التي تجعلنا على يقين من أن مبادئ نيوتن الثلاثة تقرر بالفعل الصفات الجوهرية لجميع الأجسام الفيزيائية عندما لا يتم أخذ الجاذبية في الاعتبار. إن أي جسم فيزيائي عبارة عن أنبوب كوني في الزمكان. إذا كان هناك مجرد أنبوب كوني واحد في منطقة زمكانية معينة، فإنه يكون مستقيمًا في زمكان مينكوفسكي أو جيوديسيًا في زمكان منحن. هذا يعني بلغة الأبعاد الثلاثية أن الأنبوب الكوني المستقيم ندركه على أنه جسم ثلاثي الأبعاد

يتحرك من تلقاء نفسه بسرعة ثابتة (في حالة زمكان مينكوفسكي). وبما أن حركة أي جسم حر بواسطة القصور الذاتي تعتبر مظهرًا مؤيدًا لحقيقة أن الأنبوب الكوني للجسم يكون مستقيمًا، فإننا نعلم الآن لماذا ينجح مبدأ نيوتن الأول – باقتناصه لمفهوم القصور الذاتي، استطاع أن يعكس حقيقة أن الأنبوب الكوني لجسم حر عبارة عن 'خط' مستقيم في زمكان مينكوفسكي. عندما يكون الأنبوب الكوني لجسم منحنيًا بواسطة أنبوب كوني آخر فإنه يقاوم التشوه، وكما سنرى في الفصل التاسع، تأخذ القوة المقاومة (القصورية) صيغة قانون نيوتن الثاني. عندما يشوه أنبوبان كونيان بعضهما بعضًا بالتبادل، يقاوم كل منهما تشوهه الذي حدث بسبب الأنبوب الكوني الآخر، مما يبين أن ما يعتبر قوة خارجية بالنسبة لأحد الأنبوبين الكونيين يكون قوة مقاومة بالنسبة للأنبوب الكوني الآخر والعكس بالعكس. نتيجة لهذا التماثل يكون للقوتين الساكنتين (في الزمكان) مقداران يتساويان واتجاهان متعاكسان، وهو مبدأ نيوتن الثالث. لذا، فإنه طبقًا للنسبية الخاصة، تكون مبادئ نيوتن الثلاثة ببساطة نصوصًا تقرر أن هناك أنابيب كونية مستقيمة في زمكان مينكوفسكي، مثلها مثل الأنابيب أو القضبان العادية، تقاوم عندما تتعرض للتشوه.

من الواضح، فيما أعتقد، أن الطريقة التي تمت بها هنا صياغة ومناقشة مشكلة تبرير الاستقراء تستثني حالات عديدة عادة ما يُنظر إليها على أنها حالات استدلال استقرائي. فمثلاً، إذا كانت مائة رحلة جوية عبر الأطلسي آمنة فمن المعتقد أننا نطبق الاستدلال الاستنباطي عندما نتوقع أن تكون الرحلة رقم مائة وواحد آمنة أيضًا. ولكن إذا لم تكن كذلك، عندئذ هل ينبغي أن نفترض أن الاستنتاجات الاستقرائية غير موثوق بها؟ من المؤكد أن الرحلة رقم مائة وواحد كانت مختلفة عن الرحلات الأخرى عندما يتعلق الأمر بالعوامل المسئولة عن سلامة رحلة ما. يدخل في مثل تلك المواقف

الكثير من العوامل، ويكون من المستحيل فعليًا النظر لجميع الحالات على أنها متساوية من جميع النواحي المتعلقة؛ بهذا المعنى لا تكون الرحلات المائة الأولى متساوية أيضًا. لهذا السبب، في حالات مماثلة، يكون للمرء خياران – إما إعادة تعريف الاستنتاج الاستقرائي لكي يشتمل على حالات مفحوصة وغير مفحوصة ليست متساوية، أو تقديم *استنتاج احتمالي* لتغطية جميع الحالات التي تكون فيها الحالات المفحوصة والتي لم تفحص غير متساوية من جميع النواحي. يوضح الفحص الدقيق للطريقة التي يعمل بها الاستقراء في العلم (خاصة في الفيزياء) أن الفاصل لأي استنتاج استقرائي يشمل فقط الحالات المفحوصة والتي لم تفحص بحيث تكون متساوية من جميع النواحي المتعلقة، أيْ الحالات المفحوصة وغير المفحوصة للظاهرة نفسها. إذا لم يكن الحال كذلك، لما أصبح باستطاعتنا التحدث عن قانون الطبيعة نفسها، ولتكن، مثلاً، حالة غليان الماء. لهذا ينبغي على المرء أن يحافظ على مفهوم الاستنتاج الاستقرائي للحالات المفحوصة وغير المفحوصة للظاهرة نفسها أو للفئة من الأجسام نفسها. في جميع الحالات الأخرى، ينبغي استخدام الاستنتاج الاحتمالي.

وحيث إن العلم، بما في ذلك النسبية الخاصة، يتعامل مع الاستنتاجات الاستقرائية، فمن الواضح أنه ينبغي علينا أن نعني بموثوقية هذا النوع من الاستنتاج. لقد أوضح تحليلنا أنه يمكننا الوثوق به، لأن الاستنتاجات الاستقرائية الصائبة هي، في الواقع، استنتاجات استنباطية خفية، وبالتالي تكون موثوقة مثلها مثل الاستنتاجات الاستنباطية ذاتها. بهذا تتم معالجة أول صورة من حجة موثوقية المعرفة العلمية، وقد رأينا أنه حتى هذه الحجة الفلسفية لا تتحدى ثقتنا في النسبية الخاصة. هذا يعني أن تضمينات النسبية لواقعية الزمكان سارية.

الصورة الثانية من حجة موثوقية المعرفة العلمية تطبق في حالات التجارب التي تناقض نظرية علمية ما ومسلماتها. عندما تكون مسلمة ما متناقضة مع تجربة ما، هل ينبغي علينا أن نستنتج من ذلك أنه كان نتيجة استدلال استقرائي مطبق بصورة خاطئة؟ قد يلقى اللوم على استنتاج استقرائي بسبب التناقض في حالات عندما يراد تطوير نظرية جديدة واختبار مسلمات مختلفة. لكن هذا احتمال بعيد إذا ما اكتُشف مثل ذلك التناقض في نظرية *مقبولة*، مما يعني أن المسلمة كان يتم اختبارها مرارًا وتكرارًا. يبدو إذًا أن الخيار الوحيد المتبقي لتفسير التناقض هو فشل استقراء ما. فهل هناك عيب إذًا في التحليل الذي تم إجراؤه في هذا القسم؟ عند هذه المرحلة سيكون من المجزي افتراض أن هذا بالفعل هو الحال، ونحاول إيجاد العيب. سوف نرى في القسم التالي أنه، في حالة نظرية ما تأكدت تنبؤاتها بالتجربة مرارًا وتكرارًا، لا يستلزم أي تناقض لتنبؤ معين مع الحقيقة التجريبية بالضرورة أن تكون مسلمة ما (وبالتالي الاستنتاج الاستقرائي المستخدم في صياغتها) خاطئة بالضرورة في النطاق الذي تم فيه اختبار التنبؤات بنجاح.

ب.٢ مبدأ التناظر ونمو المعرفة العلمية

كان بوبر واثقًا من أنه إذا تناقض تنبؤ ما لنظرية ما مع تجربة ما فمن الضروري أن يعني ذلك نقض مسلمة ما، وبالتالي تكون النظرية خاطئة. إن هذا الأمر واضح تمامًا، وربما لهذا السبب يقتضي الرأي السائد بشأن تأكيد وصحة النظريات العلمية أن تكون أي نظرية قابلة لإثبات أنها خاطئة. بصياغة بوبر، أعلى مرتبة يمكن لنظرية علمية ما تحقيقها لم يتم دحضها بعد. لو كانت هذه الرؤية صائبة، لكان لأولئك الذين لا ينشغلون بتضمينات النسبية الخاصة وجهة نظر جيدة – قد تحل نظرية جديدة في يوم ما محل النسبية الخاصة وقد يُكتَشف تفسير جديد للدليل التجريبي المؤكد للتنبؤات النسبوية.

من ناحية أخرى، إذا كانت مثل هذه الرؤية تعني ضمناً، بالنسبة لنظرية ما مقبولة ظهر فيما بعد أن تنبؤاتها تناقض التجربة، أنها خاطئة ويجب الاستغناء عنها، فإنها ببساطة لا تعكس الوضع الواقعي في العلم. على سبيل المثال، التنبؤات المشتقة من معادلات الحركة للنسبية الخاصة تناقض بصورة واضحة الدليل التجريبي الميكانيكي الكمومي. لكن لم يصرح أحد بأن النسبية الخاصة نظرية خاطئة. عندما يُكتَشف أن تنبؤاً لنظرية ما، كان يتم باستمرار وبصورة ناجحة اختبار تنبؤاتها الأخرى، يناقض بعض التجارب الجديدة، فإن التفسير الأكثر احتمالاً هو أن النظرية طُبقت خارج نطاق قابليتها للتطبيق. مثل ذلك التفسير لا يشكك في صحة النظرية في النطاق الذي تم فيه تأكيد تنبؤاتها تجريبيًا. إن فشل معادلة الحركة النسبوية في وصف حركة الأجسام الكمومية في المثال المُعطى أعلاه هو نتيجة تطبيق النسبية الخاصة خارج نطاق قابليتها للتطبيق.

بما أن قضايا تأكيد وصحة النظريات العلمية لها أهمية مباشرة فيما يدور من نقاش حول طبيعة الزمكان، دعنا نفحص بإيجاز بأي معنى يمكن لنظرية ما مقبولة أن تكون خاطئة. سنفعل هذا عن طريق الاستفادة من مبدأ التناظر الذي تمت صياغته أول مرة في حالة الظواهر الكمومية وطبقه بور في عام ١٩٢٣ على نظرية التركيب الذري. في الانتقال من المستويات الميكروية إلى الماكروية، حيث ينبغي أن تتفق النظريتان الكلاسيكية والكمومية، يكون من الحتمي أن تُختزل ميكانيكا الكم إلى النظرية الكلاسيكية. في حالة نموذج بور للذرة، تتفق ميكانيكا الكم والميكانيكا الكلاسيكية عندما يكون فرق الطاقة بين مستويات الطاقة المسموحة الكوانتية (المكمّاه) صغيرًا جدًا للأعداد الكمومية n الكبيرة جدًا.

اتضح أن مبدأ التناظر مبدأ عالمي – أي نظرية جديدة (مهما كانت ملامحها) ينبغي أن تُختَزل إلى سابقتها المبرهنة جيدًا والتي تناظرها النظرية الجديدة عندما تطبق في النطاق الذي يكون من المعروف أن النظرية الأقل تعميمًا تكون سارية فيه. بصيغة أخرى، أي نظرية جديدة ينبغي أن تحتوي على السابقة لها كحالة خاصة مُحَدّدة. ها هو تقرير عالِم عن مصير النظريات العلمية القديمة [١٦٠]: "ميكانيكا الكم [...]لا تُزيح الميكانيكا النيوتونية، ولكن تقوم بدمجها في حد ما. تنمو النظريات العلمية بواسطة دمج ما هو معروف بالفعل والإضافة عليه [...]." إن هذا صحيح، ولكن التناظر بين نظريات مختلفة للفيزياء الحديثة يكون أكثر تعقيدًا. ها هما مثالان للتناظر بين نظريتان، يكشفان عن نواحي مختلفة لمبدأ التناظر:

• التناظر بين النسبية الخاصة والميكانيكا النيوتونية عندما تكون مقادير سرعة الأجسام صغيرة (مقارنة بمقدار سرعة الضوء)، أينما تتطابق النسبية الخاصة مع الميكانيكية النيوتونية عند الحد $v/c \to 0$ (باستثناء معادلة طاقة السكون $E = mc^2$ لجسيم، والتي ليس لها مثيل في الفيزياء قبل النسبوية).

• التناظر بين ميكانيكا الكم والميكانيكا النيوتونية عندما تُطَبق ميكانيكا الكم على مناطق ماكروية حيث تعمل الميكانيكا النيوتونية. بعبارة أخرى، تتطابق ميكانيكا الكم مع الميكانيكا النيوتونية عندما تكون كمية فيزيائية للأجسام موضع الدراسة، تسمى الفعل (الكتلة x مقدار السرعة x المسافة)، كبيرة مقارنة بثابت بلانك $\hbar$، وهو ما يكون صحيحًا في الكون الماكروي وليس على المقياس الذري.

يوضح هذان المثالان جانبين مختلفتين من مبدأ النسبية. وحيث إن النسبية الخاصة والميكانيكا النيوتونية تصفان المستوى نفسه (الماكروي) من الواقع، فإن التناظر بينهما ليس له أي نظير أنطولوجي. هذا يعكس ببساطة

عمق معرفتنا عن الكون الماكروي – النسبية الخاصة نظرية أفضل (أكثر دقة) من الميكانيكا النيوتونية – وبالتالي، فإن التناظر بين النسبية الخاصة والميكانيكا النيوتونية له في الغالب محتوى معرِفي (أبستمولوجي). لهذا فإن التناظر بين النسبية الخاصة والميكانيكا النيوتونية يوضح فقط جانبًا واحدًا من مبدأ التناظر – الناحية المعرِفية (الأبستمولوجية).

لكن الوضع يكون مختلفًا للغاية عندما يُعتبر التناظر بين ميكانيكا الكم والميكانيكا النيوتونية. في هذه الحالة يكون الجانب الأنطولوجي لمبدأ التناظر هو الجانب الفعّال، لأن التناظر بين ميكانيكا الكم والميكانيكا النيوتونية ذات محتوى أنطولوجي واضح – فهو يعكس التناظر بين الكمومية والقوانين الفيزيائية الماكروية. وبما أننا نعبر عن التناظر من وحي معرفتنا (نظرياتنا – مثل ميكانيكا الكم والميكانيكا النيوتونية)، فإن التناظر بين الكمومية والقوانين الماكروية يتضمن في النهاية عناصر معرِفية (أبستمولوجية) أيضًا.

إن الجانب المعرِفي (الأبستمولوجي) لمبدأ التناظر يعمل عند مستوى فردي من التنظيم التركيبي للمادة – فهو يتطلب أن تشمل أي نظرية جديدة لنفس المستوى النظريات السابقة كحالات مُحدّدة. هذا يعني أن النظرية الجديدة ينبغي أن تُختَزل إلى النظرية الموجودة بالفعل في النطاق الذي تعمل فيه النظرية القديمة بشكل جيد.

إن الجانب الأنطولوجي من مبدأ التناظر يُطبّق على نظريات تصف المستويات المتجاورة، مثل ميكانيكا الكم والميكانيكا النيوتونية. عندما تُصاغ نظرية جديدة تصف مستوى أكثر بدائية (يقع 'أسفل' المستوى الذي تعمل عنده النظرية الموجودة حاليًا)، فإن مبدأ التناظر يتطلب، عندما تُطبق النظرية الجديدة على المستوى 'الأعلى'، أن تُختزل إلى نظرية ذلك المستوى.

تبدو الحالة الحالية لمعلوماتنا أنها تبين أن الجانب الأنطولوجي لمبدأ التناظر يعمل بأسلوب الطريق الواحد – فهو يتطلب أن تُختزل النظرية الأكثر بدائية إلى نظرية المستوى "الأعلى"، وليس العكس. هناك سمة أخرى من سمات الجانب الأنطولوجي تحتاج إلى توضيح فيما يتعلق بالتناظر بين نظريات تصف مستويات متجاورة، يوصف كل منها بأكثر من نظرية. مثلاً، هل ينبغي أن تُختزل ميكانيكا الكم وهي النظرية الأولى على المستوى الكمومي إلى أول نظرية ماكروية (الميكانيكا النيوتونية) أو إلى النظرية الماكروية الثانية، الأكثر دقة (النسبية)؟ أو، عمومًا، هل ينبغي أن تُختزل أحدث النظريات لمستوى معين إلى أحدث النظريات التي تصف المستوى "الأعلى"؟

هناك أسئلة مفتوحة أخرى تتعلق بكلا الجانبين الأبستمولوجي والأنطولوجي لمبدأ التناظر وتحتاج إلى المزيد من البحث. فمثلاً، ينبغي أن تُعالج قضية اللاقياسية[*] (بنفس الوحدات) incommensurability (قابلية النقل أو التحويل translatability) في كلا جانبيي مبدأ التناظر. الجانب الأبستمولوجي للتناظر بين النظرية الثقالية النيوتونية والنسبية العامة يحتاج إلى اهتمام خاص. يمكن للمرء أن يجد تناظرًا بين معادلات النظريتين، ولكن التناظر بين النظامين المفاهيميين للنظريتين هو ما يحتاج إلى توضيح. مثلاً، كيف ينبغي أن يُفهم التناظر بين *الجاذبية* كقوة (في الحالة النيوتونية) و*الجاذبية كانحناء* زمكاني (في النسبية العامة). التلميح لكيفية فعل هذا هو اعتبار حقيقة أن وزننا، على سبيل المثال، الذي جرى العرف على تسميته

(*) اللاقياسي، أو ما لا يُقاس عليه incommensurable يطلق على الفريد في بابه وما لا يُقارن بغيره حكمًا أو استنباطًا. راجع المعجم الفلسفي، مجمع اللغة العربية، القاهرة ١٩٨٣م [المترجم]

بالقوة التقالية، هو قوة أيضًا في النسبية العامة، ولكنها قصورية. بل إن الحاجة إلى معالجة دعوى اللاقياسية في حالة الجانب الأنطولوجي لمبدأ التناظر تعتبر أكثر إلحاحًا. – فكيف لنا أن نفهم التناظر بين الكون الكمومي الغريب وكوننا العادي؟

يبين تحليل مبدأ التناظر أن المعرفة العلمية تنمو بطريقتين رئيسيتين:

- عن طريق توصيف أكثر دقة مستوى الكون نفسه،
- وعن طريق وصف مستويات جديدة للواقع.

التمييز بين جانبي مبدأ التناظر يجعل من الممكن معالجة سؤالين مهمين على الأقل، أولهما له صلة مباشرة بطبيعة الزمكان:

- هل يمكن تفنيد نظرية علمية مقبولة؟
- هل النظرية العلمية النهائية ممكنة؟

ب.٣ هل يمكن تفنيد نظرية علمية مقبولة؟

الجانب الأبستمولوجي لمبدأ التناظر يبين بوضوح أنه حينما تستبدل نظرية مقبولة بأخرى جديدة تظل النظرية القديمة على صواب في نطاق قابليتها للتطبيق، حيث تم إثبات تنبؤاتها *تجريبيًا*. وعند التطبيق على ظواهر تقع خارج هذا النطاق، تفشل النظرية القديمة بطبيعة الحال. لذا، فإن أي نظرية علمية لا تكون خاطئة بالمعنى المطلق كما يُزعَم أحيانًا – فهي تُعطي تنبؤات خاطئة فقط عندما تُجبر على العمل خارج نطاق قابليتها للتطبيق. يبين هذا أنه، حينما تتناقض مسلمة نظرية مقبولة مع تجربة ما، فإن المسلمة تظل سليمة طالما تعمل النظرية، مما يعني أن الاستنتاجات الاستقرائية المستخدمة في صياغتها تكون موثوقة مثلها مثل الاستنتاج الاستنباطي المستخدم لاستخلاص التنبؤات من المسلمة.

وهكذا فإن مبدأ التناظر يوضح أنه لا يمكن إثبات خطأ نظرية علمية في نطاق قابليتها للتطبيق (حيث تم إثبات تنبؤاتها تجريبيًا). إذا كنت تظن أن هذا زعم قوي للغاية، فتخيل كم عدد الناس الذين قد يشكون في أنه، بعد ألف سنة من الآن، سوف تظل الميكانيكا الكلاسيكية ستظل مطبقة عندما تبنى الجسور (هذا لو كنّا حينذاك لا نزال في حاجة إليها) وسوف تُستخدم الحسابات الكهروديناميةالكلاسيكية في توصيل أسلاك الكهرباء للمباني (هذا لو كانت الكهرباء حينئذ لا تزال مستخدمة). هذا هو السبب في أنه من غير الواقعي توقع دحض النسبية الخاصة يومًا ما في نطاق قابليتها للتطبيق، حيث تم إثبات تنبؤاتها تجريبيًا.

لكي نفهم أيضًا بصورة أفضل لماذا لن يتم أبدًا إثبات خطأ أي نظرية علمية قديمة في نطاق قابليتها للتطبيق، حيث تأكدت تنبؤاتها بالتجربة مرارًا، اعتبر القياس التالي. تخيل أنه تم التقاط صورة مدينة ما بواسطة قمر صناعي. إذا كانت درجة وضوح الصورة سيئة، فإن المباني والشوارع الرئيسية في منطقة وسط المدينة هي فقط التي سوف تظهر بوضوح. عادة لا يكون بضواحي المدينة مباني وشوارع كبيرة، وبالتالي لا يمكن رؤيتها في الصورة بوضوح. قد نقوم بتعميم معرفة ما نراه بوضوح – التخطيط الهندسي لمركز المدينة – على الضواحي، بفرض أن التخطيط نفسه قد تم استخدامه هناك. عندما تؤخذ صورة قمر صناعي أخرى بدرجة وضوح أفضل بكثير، نكتشف أن تعميمنا يكون خاطئًا. لكن الصورة الثانية لا تدحض ما تم رؤيته بوضوح في الصورة الأولى. ما تدحضه الصورة الأفضل هو التعميم على المناطق الواقعة خارج جزء من المدينة وهو وسط المدينة الذي كان يُرى بوضوح. بنفس الطريقة، أي نظرية تم اختبار تنبؤاتها تجريبيًا في نطاق قابليتها للتطبيق تعطي معرفة كافية وبالتالي موثوقة عن هذا النطاق، وسوف تظل صائبة إلى الأبد فيه.

وبما أن النظرية الجديدة هي التي تُعَرِّف النطاق الذي تكون فيه النظرية القديمة صائبة، فإنه يبدو من الممكن (وإن كان صعبًا إلى حد ما) محاولة تعريف نطاق قابلية التطبيق لنظرية موجودة *قبل* وصول النظرية الجديدة. إن تجربة طريقة دوستوفسكي – Dostoevsky للتجريب الصارم [١٦١] ربما تكون نقطة جيدة للبداية. بوضع شخصياته في مواقف متطرفة، جعلهم يكشفون عن طبيعتهم الحقيقية. طبّق آينشتين، في نسبيته الخاصة، نفس الطريقة – كشفت الطبيعة عن جانب من طبيعتها الحقيقية عندما اعتبرت حالة متطرفة لأجسام تتحرك بسرعات عالية. وبترك سرعات الأجسام تأخذ قيمًا أكبر فأكبر، فإنه يتضح الآن أن الميكانيكا الكلاسيكية تترك نطاق قابليتها للتطبيق الذي تأكدت فيه تنبؤاتها تجريبيًا، وذلك لأن تنبؤاتها لم تعد دقيقة لمقادير السرعات العالية للغاية. وبما أن اللانهايات تشكل بطبيعتها الجوهرية درجات متطرفة، فمن الواضح أنه أينما توجد لانهايات في نظرية ما يظهر موقف متطرف. لهذا فإن الدليل على أن نظرية ما تدّعي تغطية الظواهر الواقعة خارج نطاق قابليتها للتطبيق ربما يكون هو السماح بوجود لانهايات من قبل النظرية. فمثلاً، تسمح الميكانيكا النيوتونية بوجود حركات بسرعات لانهائية وهناك بالتحديد هو ما تفشل عنده. تسمح أيضًا الفيزياء النيوتونية لأي كميات فيزيائية أن تأخذ قيمًا مستمرة في الصغر أكثر فأكثر (الانقسامية اللانهائية)، وهذا نطاق آخر تفشل فيه.

ب.٤ هل النظرية العلمية النهائية ممكنة؟

يبدو أن الجانب الأبستمولوجي لمبدأ التناظر يقتضي ضمنًا أن يكون من الطبيعي توقع أنه يمكننا يومًا ما صياغة نظرية نهائية تصف مستوى معينًا من الكون والسبب يكمن في أن أي مستوى يمكن وصفه بدلالة عدد *متناهٍ* من أنواع أجسام وقوانين فيزيائية، وبالتالي لا يمكن توقع أن يكون عدد لا نهائي نظريًا من النظريات ضروريًا ليصف الأجسام والقوانين الخاصة بمستوى مفرد من الكون باستيفاء كافٍ.

لكن التطلع إلى نظرية نهائية لا يعني نهاية العلم. فالجانب الأنطولوجي لمبدأ التناظر ينطوي على إمكان نمو لانهائي لمعرفتنا. وإذا كان هناك عدد لانهائي من المستويات للكون، فإننا سوف نحتاج بوضوح إلى عدد لانهائي من النظريات لوصف كل شيء موجود.

ب.٥ ملخص

كنا معنيين هنا بجانبيْ موثوقية حجة المعرفة العلمية ضد صلاحية النسبية الخاصة. ورأينا أن الحجة تفشل. الاستنتاجات الاستقرائية يمكن الوثوق بها بقدر الاستنتاجات الاستنباطية نفسها، لأنها استنتاجات استنباطية خفية. لهذا فإنه لا يمكن التشكيك في صلاحية النسبية الخاصة على أساس أن الاستنتاجات الاستقرائية غير موثوق بها. الجانب الثاني من الحجة الفلسفية المعارضة لصلاحية النسبية الخاصة يقضي بأن أي نظرية يمكن دحضها من حيث المبدأ. لقد كشف فحص الصلاحية لنظرية علمية بدلالة مبدأ التناظر عدة نتائج هامة:

- لا يمكن دحض نظرية علمية في نطاق قابليتها للتطبيق، حيث تأكدت تنبؤاتها تجريبيًا (وبالتالي ستظل النسبية الخاصة صائبة في النطاق الذي تم فيه اختبارها تجريبيًا بنجاح)؛
- هناك طريقتان رئيسيتان لنمو المعرفة العلمية – بواسطة وصف أكثر دقة للمستوى نفسها للكون بواسطة وصف مستويات جديدة للواقع؛
- لا ينافي الحقيقة والواقع أن نتوقع إمكان وصف كل مستوى من الكون بنظرية علمية نهائية، لكن هذا لا يعني ضمنًا نهاية للعلم، لأن المستويات المتبقية للكون سوف توصف بنظريات مختلفة.

ملحق ج

نظرية الكتلة الكهرومغناطيسية الكلاسيكية والجدل المثار ضدها

طبقًا لنظرية الكتلة الكهرمغناطيسية الكلاسيكية، يكون التنافر اللامُتّزن للعناصر الحجمية لشحنة إلكترون متسارع نتيجة لمجاله المشوش هو ما يسبب القصور الذاتي للإلكترون والكتلة القصورية. بما أن المجال الكهربي لإلكترون قصوري (يمثل بخط كوني مستقيم في زمكان مستوٍ) هو مجال كولوم، فإن التنافر بين عناصر شحنته يلغي بعضها بعضًا تمامًا ولا توجد محصلة قوة تؤثر على الإلكترون. رغم ذلك، لو تسارع الإلكترون، فإن مجاله يتشوش، ويضطرب الاتزان في تنافر عناصره الحجمية، ويتعرض نتيجة لذلك إلى محصلة قوة ذاتية $\mathbf{F}_{\text{self}}$ تقاوم تسارعه – إنها تلك المقاومة التي تنظر إليها نظرية الكتلة الكهرومغناطيسية الكلاسيكية على أنها القصور الذاتي للإلكترون. إن القوة الذاتية تقابل القوة الخارجية التي تُسرِّع الإلكترون (أيْ يكون اتجاهها عكس تسارع الإلكترون a) ويتضح أنها متناسبة مع **a**: $\mathbf{F}^{a}_{\text{self}} = -m^{a}\mathbf{a}$، حيث يمثل معامل التناسب m^{a} الكتلة القصورية للإلكترون ويساوي U/c^{2}، حيث U هي طاقة المجال الإلكتروني؛ وبالتالي فإن الكتلة القصورية للإلكترون هي في الأصل كهرومغناطيسية.

يمكن حساب الكتلة الكهرومغناطيسية للإلكترون الكلاسيكي بواسطة ثلاث طرق مستقلة [١٥٤]:

• الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من الطاقة $m_{t} = U / c^2$، حيث U هي طاقة المجال لإلكترون في حالة سكون. [عندما يكون الإلكترون متحركًا بسرعة نسبوية v، يكون إذًا $m_{t} = U / \gamma c^2$، حيث $\gamma = (1 - v^2 / c^2)^{-1/2}$.]

• الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من كمية التحرك $m_p = p / v$، حيث p هي كمية تحرك المجال عندما يكون الإلكترون متحركًا بسرعة مقدارها v. (في حالة السرعات النسبوية $m_p = p / \gamma v$).

• الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من القوة الذاتية $m_s = \mathrm{F}_{\mathrm{self}} / a$، حيث $\mathrm{F}_{\mathrm{self}}$ هي القوة الذاتية المؤثرة على إلكترون عندما يكون تسارعه a. (في حالة السرعات النسبوية $m_s = \mathrm{F}_{\mathrm{self}} / \gamma^3 a$).

كانت هناك حجتان ضد النظر إلى الكتلة الكلية لجسيم مشحون على أنها كهرومغناطيسية في الفيزياء الكلاسيكية (اللاكمومية):

• هناك معامل مقداره 4/3 يظهر في الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من كل من كمية التحرك والقوة الذاتية – $m_p = 4m_{t} / 3$ و $m_s = 4m_{t} / 3$. (الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من الطاقة لا يظهر فيها هذا المعامل.) من الواضح أنه ينبغي أن تكون الأنواع الثلاثة من الكتلة الكهرومغناطيسية متساوية.

• القصور الذاتي وكتلة الإلكترون الكلاسيكي ينبُعان من التنافر المتبادَل اللامُتّزن 'لأجزائه' نتيجة المجال الكهربي المشوَّش للإلكترون. على الرغم من ذلك، ليس واضحًا ما الذي يُبقي الإلكترون مستقرًا لأن النموذج الكلاسيكي للإلكترون يصف شحنته على أنها موزعة بانتظام على غلاف كروي، وهذا يعني أن عناصرها الحجمية تميل إلى التعاظم لأنها تتنافر مع بعضها بعضًا.

اعتبر فاينمان Feynman أن المعامل 4/3 في معادلة الكتلة الكهرومغناطيسية يشكل مشكلة حقيقية لأنه جعل نظرية الكتلة الكهرومغناطيسية (التي تفضي إلى علاقة غير صائبة بين الطاقة وكمية التحرك نتيجة للمعامل 4/3) غير متسقة مع نظرية النسبية الخاصة [١١٥، ص 4-28]: "لهذا يستحيل أن نجد الكتلة كلها كهرومغناطيسية بالطريقة التي كنا نأملها. فلن تكون النظرية مشروعة إذا لم يكن لدينا شيء غير الكهرومغناطيسيات." يبدو أنه لم يكن على دراية بأن المعامل 4/3 الذي يظهر في الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من كمية التحرك قد نوقش بالفعل في أعمال ماندل Mandel [١٣٦]، ويلسن Wilson [١٣٧]، برايس Pryce [١٣٨]، كوال Kwal [١٣٩]، و رورليش Rohrlich [١٤٠]. (قام كل منهم مستقلاً عن الآخر بإزالة ذلك المعامل.) لقد كانت الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من القوة الذاتية هي الأكثر صعوبة في التعامل معها، فكانت تؤدي بإصرار إلى المعامل 4/3. بواسطة تطبيق مبدأ هاملتون في عام ١٩٢١، كان فيرمي [١١٢] أول من بين بصورة غير مباشرة أنه لم يكن هناك معامل 4/3 في القوة الذاتية المؤثرة على شحنة مثبتة في مجال ثقالي. في الفصل التاسع، رأينا كيف أن المعامل 4/3 قد نوقش لحالة إلكترون ساكن في إطار إسناد متسارع N^a وفي إطار N^g ساكن في مجال ثقالي شدته g، موصوف في N^a و N^g، على التوالي. بعد أن تم حذف المعامل 4/3، أصبحت نظرية الكتلة الكهرومغناطيسية للإلكترون الكلاسيكي متسقة بالكامل مع النسبية واتضح أن كتلة الإلكترون الكلاسيكية في الأصل كهرومغناطيسية المنشأ تمامًا.

لم يكن باستطاعة نظرية الكتلة الكهرومغناطيسية، منذ بدايتها قبل قرن، تفسير لماذا يكون الإلكترون مستقرًا (ما الذي يُبقي على شحنته مجتمعة مع بعضها). لقد بدا هذا الإخفاق على أنه مرتبط بوجود المعامل 4/3 وتم استخدامه كدليل ضد النظر إلى كتلته الكاملة على أنها كهرومغناطيسية.

لتفسير المعامل 4/3، تم افتراض أن جزءًا من كتلة الإلكترون (اعتُبِر أنه ميكانيكي) ينشأ من قوى لاكهربية (تعرف بإجهادات بوانكاريه – the Poincar´e stresses [١٣١، ١٣٢]) تحتفظ بشحنة الإلكترون مجتمعة مع بعضها. كان إدراج تلك القوى في نموذج الإلكترون الكلاسيكي والكتلة الميكانيكية الناتجة هو ما عادل المعامل 4/3 بواسطة اختزال الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من كمية التحرك من $(4/3)m_t$ إلى m_t. يوضح هذا أن قوى بوانكاريه *الجاذبة* تسهم مشاركة *سلبية* في كتلة الإلكترون الكاملة. لكن اتضح أن المعامل 4/3 كان نتيجة حسابات غير صائبة للكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من كمية التحرك كما تبين من ماندل Mandel [١٣٦]، ويلسن Wilson [١٣٧]، برايس Pryce [١٣٨]، كوال Kwal [١٣٩]، و رورليش Rohrlich [١٤٠]. حيث إنه لم يتبقَ شيء ليتم مُعادَلته (بالنسبة للكتلة)، لو كانت هناك بعض القوى الجاذبة الغير معروفة مسئولة عن الإمساك بشحنة الإلكترون مجتمعة مع بعضها، فإن مشاركتها السلبية (كقوى جاذبة) في كتلة الإلكترون تختزلها من m_t إلى $(2/3)m_t$.

من الواضح أن هناك خيارين في مثل ذلك الموقف – إما البحث هذه المرة عما يُعادل المشاركة السلبية لإجهادات بوانكاريه في الكتلة، أو افتراض أن الفرض الذي يقضي بوجودها لم يكن ضروريًا من البداية (خاصة بعد أن اتضح أن المعامل 4/3 لا يظهر في الحساب الصائب للكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من كمية التحرك). الحجة القوية التي تؤيد الخيار الأخير هي حقيقة أنه، لو كانت توجد مشكلة واقعية مع استقرار الإلكترون، لكانت هناك حاجة لإجهادات بوانكاريه لموازنة التنافر المتبادل للعناصر الحجمية، ليس فقط لإلكترون يتحرك بسرعة ثابتة (كما في حالة الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من كمية التحرك)، ولكن أيضًا لإلكترون ساكن في إطار سكونه. لكن هذا

ليس هو الحال لأنه عندما يكون الإلكترون ساكناً، فإنه لا يكون هناك وجود لمشكلة المعامل 4/3 في كتلة الإلكترون الكهرومغناطيسية المشتقة من طاقة السكون. لو كانت شحنة الإلكترون تميل إلى التعاظم كنتيجة للتنافر المتبادل *لأجزائها*، فينبغي أن تفعل ذلك، ليس فقط عندما تكون متحركة بسرعة ثابتة، ولكن عندما تكون أيضًا ساكنة. بطريقة ما قد تم التغاضي عن تلك الحجة الواضحة.

دليل آخر على أن مشكلة الاستقرار لا تبدو مشكلة واقعية، هو أنها لم تظهر (خلال المعامل 4/3) في الحسابات الصائبة للقوة الذاتية أيضًا. كما بين فيرمي [١١٢]، وكما رأينا في الفصل التاسع، لا تكون هناك حاجة لإجهادات بوانكاريه لاشتقاق الكتلة الكهرومغناطيسية المشتقة من القوة الذاتية لأن المعامل 4/3 الذي كان موجودًا في الاستنتاجات السابقة للقوة الذاتية اتضح أنه نتيجة عدم إدراج عنصر حجمي لامتماثل اتجاهيًا في الحسابات ينشأ نتيجة سرعة الضوء اللامتماثلة اتجاهيًا في أطر الإسناد اللاقصورية حيث تم حساب القوة الذاتية.

يقتضي كل هذا ضمناً عدم وجود مشكلة واقعية مع استقرار الإلكترون. لا نعرف السبب. لكن ما نعرفه بالفعل هو أنه، لو كانت هناك مشكلة استقرار، لظهرت في نهاية المطاف في جميع حسابات الكتلة الكهرمغناطيسية المشتقة من الطاقة، وكمية التحرك، والقوة الذاتية، وهو ما لم يحدث. من الواضح أنه، ينبغي وجود إجابة للسؤال عن لماذا تجرى حسابات معتمدة على نموذج الإلكترون الكلاسيكي المسلم بخطئه (١) بالوصف الصحيح لسلوكه القصوري والثقالي (بما في ذلك تكافؤ كتلتيه القصورية والثقالية المُطاوعة)، (٢) بالوصول إلى المعادلات الصائبة للقوتين القصورية والثقالية. تخميني لما قد تكون عليه تلك الإجابة هو أن هناك شيئًا

ما في النموذج الكلاسيكي يؤدي إلى النتائج الصائبة. في الغالب، التوزيع الكروي للشحنة. لكن ليس من الضروري فرض أن هذا التوزيع هو غلاف كروي *جامد* موجود عند كل لحظة وحيدة كغلاف جامد (مثل الأجسام الماكروية التي نكون على دراية بها) – في تلك الحالة فقط سوف تتنافر 'أجزاؤه' مع بعضها بعضًا وستميل الكرة إلى التعاظم. كما رأينا في الفصل العاشر، قد يخطر بالبال تصور أن الشحنة *الأولية* كروية ولكنها ليست جامدة (بتوزيع متصل للشحنة).

حقيقة أن المعامل 4/3 قد تم تفسيره أن مشكلة الاستقرار لا تبدو مشكلة واقعية (لأنها لا تظهر لا في كتلة الإلكترون الكهرومغناطيسية المشتقة من طاقة السكون ولا في حسابات القوة الذاتية) تدل عل أنه، في حالة الإلكترون الكلاسيكي، تفند الحجج الرافضة لاعتبار قصوره الذاتي وكتلته القصورية على أنهما كهرومغناطيسيا المنشأ تمامًا.

حساب القوة الذاتية

القوة الذاتية

$$\mathbf{F}^{a}_{\text{self}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{1}{c^2 r}\mathbf{a}\right)\left(1+\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{r}}{2c^2}\right)\rho^2 dV dV_1$$

يمكن كتابتها (بحدود متناسبة مع c^{-2}) على الصورة

$$\mathbf{F}^{a}_{\text{self}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{3}{2}\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{1}{c^2 r}\mathbf{a}\right)\rho^2 dV dV_1 \,. \qquad (D.1)$$

لقد وصلنا إلى هذه النتيجة بفرض أن عنصر الشحنة de^a يؤثر على عنصر الشحنة de_1^a. في هذه الحالة يبدأ المتجه $\mathbf{r}$ عند de^a وينتهي عند de_1^a، أي أن، $\mathbf{n}$ يشير من de^a إلى de_1^a. لو افترضنا أن de_1^a أثرت على de^a، عندئذ ينبغي أن تكون النتيجة واحدة. حيث إن استبدال عنصري الشحنة يعكس اتجاه n، ستكون القوة الذاتية في هذه الحالة

$$\mathbf{F}^{a}_{\text{self}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(-\frac{\mathbf{n}}{r^2}+\frac{3}{2}\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{1}{c^2 r}\mathbf{a}\right)\rho^2 dV dV_1 \qquad (D.2)$$

بجمع المعادلتين (D.1) و(D.2) وقسمة الناتج على ٢، نحصل على

$$\mathbf{F}^{a}_{\text{self}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(\frac{3}{2}\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{c^2 r}\mathbf{n}-\frac{1}{c^2 r}\mathbf{a}\right)\rho^2 dV dV_1 \,. \qquad (D.3)$$

لكي نجري التكامل (D.3)، دعنا نعتبر التكامل [١٥٠]

$$\mathbf{I} = \int\int \left(\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}}{r}\mathbf{n}\right) dV dV_1 \,. \qquad (D.4)$$

يمكننا وضع $\mathbf{n} = \mathbf{n}_{\parallel} + \mathbf{n}_{\perp}$، حيث $\mathbf{n}$ يكون متوازيًا مع $\mathbf{a}$ و $\mathbf{n}_{\perp}$ يكون عموديًا على $\mathbf{a}$. عندئذ:

$$\begin{aligned}(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n})\mathbf{n} &= \mathbf{a}\cdot\left(\mathbf{n}_{\parallel}+\mathbf{n}_{\perp}\right)\left(\mathbf{n}_{\parallel}+\mathbf{n}_{\perp}\right)\\ &= \left(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}+\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\perp}\right)\left(\mathbf{n}_{\parallel}+\mathbf{n}_{\perp}\right)\\ &= \left(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}\right)\mathbf{n}_{\parallel}+\left(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}\right)\mathbf{n}_{\perp}+\left(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\perp}\right)\mathbf{n}_{\parallel}+\left(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\perp}\right)\mathbf{n}_{\perp}\\ &= \left(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}\right)\mathbf{n}_{\parallel}+\left(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}\right)\mathbf{n}_{\perp}\,.\end{aligned}$$

لأن $(\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\perp}) = 0$. التعويض بهذه النتيجة في (D.4) يؤدي إلى

$$\mathbf{I} = \int\int \left(\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}}{r}\mathbf{n}_{\parallel}\right) dV dV_1 + \int\int \left(\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}}{r}\mathbf{n}_{\perp}\right) dV dV_1 \,. \qquad (D.5)$$

لتسهيل الحسابات أكثر، دعنا نفترض أن $\mathbf{r}$ قد أُديرت 180° حول محور متوازٍ مع $\mathbf{a}$ ويمر خلال مركز توزيع الشحنة الكروي للإلكترون. عندئذ فإن المتجه $\mathbf{n} = \mathbf{n}_{\parallel} + \mathbf{n}_{\perp}$ يصبح $\mathbf{n}_{\parallel} - \mathbf{n}_{\perp}$. هذا يعني أنه، في التكامل الثاني في (D.5)، يكون لكل مشاركة أولية

$$\left(\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}}{r}\mathbf{n}_{\perp}\right) dV dV_1 \,,$$

يوجد أيضًا مشاركة متساوية ومعكوسة

$$-\left(\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{n}_{\parallel}}{r}\mathbf{n}_{\perp}\right) dV dV_1 \,.$$

مما يبين أن التكامل الثاني في (D.5) يكون صفرًا ويمكننا كتابة

$$\mathbf{I} = \int\int \left(\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{n}_{\|}}{r} \mathbf{n}_{\|} \right) dV dV_1 \,. \qquad (D.6)$$

إن التكامل I هو الآن دالة في **n** وحده. لكي نعود إلى حالة **n** العامة (ولا نقتصر على استخدام **n**)، سوف نعبر عن التكامل في (D.6) بدلالة **n** ومتجه وحدة **u** في اتجاه **a**. وبما أن **n** متوازٍ مع **a**، إذًا فلدينا $\mathbf{a} \cdot \mathbf{n} = an$. إذًا يمكننا كتابة

$$\begin{aligned}(an_{\|})\mathbf{n}_{\|} &= \mathbf{a}(n_{\|})^2 = \mathbf{a}\left[1^2 (n_{\|})^2\right] \\ &= \mathbf{a}\left(1 n_{\|}\right)^2 = \mathbf{a}\left(u n_{\|}\right)^2 = \mathbf{a}(un\cos\theta)^2 \\ &= \mathbf{a}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})^2 \,,\end{aligned}$$

حيث θ هي الزاوية التي يصنعها المتجه **n** مع متجه التسارع **a**. يمكننا الآن كتابة التكامل في (D.6) على الصورة

$$\mathbf{I} = \mathbf{a} \int\int \frac{(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})^2}{r} dV dV_1 \,. \qquad (D.7)$$

استنادًا إلى أبراهام [١٢٨] و لورنتز [١٣٠]، افترضنا توزيعًا كرويًا تماثليًا لشحنة الإلكترون. يبين هذا أنه، بما أن جميع اتجهات الفضاء تكون غير قابلة للتمييز، فإن التكامل في (D.7) ينبغي أن يكون غير معتمد على اتجاه متجه الوحدة **u**. ومن ثم ينبغي أن يكون متوسط هذا التكامل على جميع اتجهات **u** الممكنة مساويًا للتكامل نفسه:

$$\int\int \frac{(\mathbf{u}\cdot\mathbf{n})^2}{r}\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1 = \frac{1}{4\pi}\int \mathrm{d}\Omega \int\int \frac{(\mathbf{u}\cdot\mathbf{n})^2}{r}\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1 \qquad \text{(D.8)}$$

$$= \frac{1}{4\pi}\int\int \frac{\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1}{r}\int (\mathbf{u}\cdot\mathbf{n})^2\mathrm{d}\Omega\,,$$

حيث $\mathrm{d}\Omega$ هو عنصر من زاوية مجسمة يقع عليها متجه وحدة معين $\mathbf{u}$. لإجراء هذا التكامل، نختار نظام إحداثيات قطبيًا مع محور قطبي على طول $\mathbf{n}$. إذًا $\mathbf{u}\cdot\mathbf{n} = \cos\theta$ و $\mathrm{d}\Omega = \sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\varphi$ ويكون

$$\frac{1}{4\pi}\int (\mathbf{u}\cdot\mathbf{n})^2\mathrm{d}\Omega = \frac{1}{4\pi}\int_0^{\pi}\cos^2\theta\sin\theta\mathrm{d}\theta\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\varphi$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\pi}\cos^2\theta\sin\theta\mathrm{d}\theta$$

$$= \frac{1}{2}\left(-\frac{1}{3}\cos^3\theta\Big|_0^{\pi}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left[-\frac{1}{3}(-1-1)\right]$$

$$= \frac{1}{3}\,.$$

التعويض بهذه النتيجة في (D.8) يؤدي إلى

$$\int\int \frac{(\mathbf{u}\cdot\mathbf{n})^2}{r}\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1 = \frac{1}{3}\int\int \frac{\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1}{r}\,.$$

بذلك يكون لدينا بالنسبة للتكامل (D.7)

$$\mathbf{I} = \mathbf{a}\int\int \frac{(\mathbf{u}\cdot\mathbf{n})^2}{r}\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1 = \frac{\mathbf{a}}{3}\int\int \frac{\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1}{r}\,. \qquad \text{(D.9)}$$

بتعويض (D.9) في (D.3) نحصل على

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\int\left(\frac{3}{2}\frac{\mathbf{a}}{3c^2 r} - \frac{\mathbf{a}}{c^2 r}\right)\rho^2\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1$$

$$= -\frac{\mathbf{a}}{8\pi\varepsilon_0 c^2}\int\int\frac{\rho^2}{r}\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1\,,$$

وأخيرًا تكون معادلة القوة الذاتية على الصورة

$$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}_{\mathrm{self}} = -\frac{U}{c^2}\mathbf{a}\,,$$

حيث

$$U = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\int\int\frac{\rho^2}{r}\mathrm{d}V\mathrm{d}V_1\,.$$

المراجع

1. H. Weyl: *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (Princeton University Press, Princeton 1949) p. 116

2. Galileo: *Dialogues Concerning Two Sciences*. In: S. Hawking (ed.), *On The Shoulders Of Giants*, (Running Press, Philadelphia 2002) pp. 399-626

3. N. Copernicus: *On the Revolutions of the Heavenly Spheres*. In: *Great Books of the Western World*, Vol. 15, ed. by M.J. Adler (Encyclopedia Britannica, Chicago 1993)

4. J. Kepler: *Harmonies of theWorld*, Book Five. In: *On the Shoulders of Giants:*

The Great Works of Physics and Astronomy, ed. by S. Hawking (Running Press, Philadelphia, London 2002)

5. G. Galileo: *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems – Ptolemaic and Copernican*, 2nd edn. (University of California Press, Berkeley 1967)

6. J. Barnes: *Early Greek Philosophy*, 2nd edn. (Penguin Books, London 2001) Part II

7. J. Barnes: *The Presocratic Philosophers* (Routledge, London, New York 1982) Chap. X

8. Aristotle: *Physics*. In: *Great Books of the Western World*, Vol. 7, ed. By M.J. Adler (Encyclopedia Britannica, Chicago 1993)

9. C. Ptolemy: *The Almagest*. In: *Great Books of the Western World*, Vol. 15, ed. by M.J. Adler (Encyclopedia Britannica, Chicago 1993) pp. 8–13

10. R. Moore: *Niels Bohr: The Man, His Science, and the World They Changed* (MIT Press, Michigan 1985) p. 196

11. H. Minkowski: Space and Time. In: [12] pp. 75–91

12. H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, and H.Weyl: *The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity* (Dover, New York 1952)

13. H. Poincar'e: *Science and Hypothesis* (Walter Scott Publishing, London 1905) p. 90

14. A. Einstein: On the Electrodynamics of Moving Bodies. In: [12] pp. 37–65

15. A. Sommerfeld: Notes on Minkowski's paper: Space and Time. In: [12] pp. 92–96

16. W. Pauli: *Theory of Relativity* (Dover, New York 1958) p. 4

17. A.P. French: *Special Relativity* (Norton, New York, London 1968) p. 72

18. R. Resnick, D. Halliday: *Basic Concepts in Relativity and Early Quantum Theory*, 2nd edn. (Macmillan, New York 1992) p. 27

19. U.E. Schr"oder: *Special Relativity* (World Scientific, Singapore 1990) p. 19

20. W.D. McComb: *Dynamics and Relativity* (Oxford University Press, Oxford, New York 1999) p. 187

21. R. Geroch: *General relativity from A to B* (University of Chicago, Chicago 1978) pp. 20-21

22. C.H. Hinton: *What is the Fourth Dimension?* (W.S. Sonnenschein and Co., London 1884)

23. C.H. Hinton: *Speculations on the Fourth Dimension: Selected Writings* (Dover, New York 1980)

24. R. Le Poidevin: *Travels in Four Dimensions: The Enigmas of Space and Time* (Oxford University Press, Oxford, New York 2003) p. 48

25. E.F. Taylor, J.A. Wheeler: *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity*, 2nd edn. (Freeman, New York 1992)

26. W. Rindler: *Relativity* (Oxford University Press, Oxford, New York 2001)

27. A. Einstein: *Relativity: The Special and General Theory* (Routledge, London 2001) p. 152

28. A.S. Eddington: *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory* (Cambridge University Press, Cambridge 1920)

29. H. Stein: Phil. Sci. **58**, 147 (1991)

30. C.W. Rietdijk: Phil. Sci. **33**, 341 (1966)

31. H. Putnam: J. Phil. **64**, 240 (1967)

32. N. Maxwell: Phil. Sci. **52**, 23 (1985)

33. H. Stein: J. Phil. **65**, 5 (1968)

34. D. Dieks: Phil. Sci. **55**, 456 (1988)

35. S. McCall and E.J. Lowe: Analysis **63**, 114 (2003)

36. Y. Balashov: On Stages, Worms, and Relativity. In: [38]

37. C. Callender: Phil. Sci. **67** (Proceedings), S587 (2000)

38. C. Callender (Ed.): *Time, Reality and Experience* (Cambridge University Press, Cambridge 2002)

39. S. Saunders: How Relativity Contradicts Presentism. In: [38]

40. S. Savitt: Phil. Sci. **67** (Proceedings), S563 (2000)

41. T. Sider: *Four-Dimensionalism. An Ontology of Persistence and Time* (Clarendon Press, Oxford 2001)

42. B. Rossi, D.B. Hall: Phys. Rev. **59**, 223 (1941)

43. J.B. Hartle: *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Addison Wesley, San Francisco 2003)

44. E. Dewan, M. Beran: Note on Stress Effects Due to Relativistic Contraction, American Journal of Physics **27**, 517–518 (1959)

45. A.A. Evett and R.K. Wangsness: Note on the Separation of Relativistically Moving Rockets, American Journal of Physics **28**, 521–606 (1960)

46. P.J. Nawrocki: Stress Effects Due to Relativistic Contraction, American Journal of Physics **30**, 771–772 (1962)

47. E.M. Dewan: Stress Effects Due to Lorentz Contraction, American Journal of Physics **31** (5) 383–386 (1963)

48. A.A. Evett: A Relativistic Rocket Discussion Problem, American Journal of Physics **40**, 1170–1171 (1972)

49. J.S. Bell: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge 1987) p. 67

50. D.G. Boulware: Radiation from a Uniformly Accelerated Charge, Annals of Physics **124**, pp. 169–188 (1980)

51. S.N. Lyle: *Uniformly Accelerating Charged Particles: A Threat to the Equivalence Principle* (Springer, Berlin 2008) p. 194

52. V. Petkov: Accelerating Spaceships Paradox and Physical Meaning of Length Contraction (to be published). arXiv.org/abs/0903.5128

53. K. G¨odel: A Remark about the Relationship Between Relativity and Idealistic Philosophy. In: *Albert Einstein: Philosopher–Scientist*, ed. by P. Schilpp, 3rd. edn. (Open Court, La Salle 1988) p. 558

54. V. Petkov: The Flow of Time According to Eleatic Philosophy and the Theory of Relativity. In: *Structur und Dynamik wissenschaftlicher Theorien*, ed. By C. Toegel (P. Lang, Frankfurm am Main Bern New York 1986) pp. 121–149

55. R.A. Mould: *Basic Relativity* (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1994)

56. C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler: *Gravitation* (Freeman, San Francisco 1973)

57. R. d'Inverno: *Introducing Einstein's Relativity* (Clarendon Press, Oxford 1992)

58. G.L. Naber: *The Geometry of Minkowski Spacetime* (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1992)

59. P. Kroes: Phil. Sci. **50**, 159–163 (1983)

60. A.S. Eddington: *The Nature of the Physical World* (Cambridge University Press, Cambridge 1929) p. 46

61. H. Poincar´e: La Mesure du Temps, Revue de m´etaphysique et de morale **6**, 1– 13 (1898). English translation in: *The Value of Science* (The Modern Library, New York 2001) pp. 210–222

62. A. Eddington: *The Mathematical Theory of Relativity*, 3rd edn. (Chelsea, New York 1975) pp. 15–16

63. H. Reichenbach: *The Philosophy of Space and Time* (Dover New, York 1958)

64. A. Gr¨unbaum: *Philosophical Problems of Space and Time*, 2nd edn. (D. Reidel Dordrecht Boston 1973)

65. A. Janis: Conventionality of Simultaneity, Online Stanford Encyclopedia of Philosophy (and the references therein)

66. D. Malament: Causal Theories of Time and the Conventionality of Simultaneity, No^us **11**, 293–300 (1977)

67. S. Sarkar and J. Stachel: Did Malament Prove the Non-Conventionality of Simultaneity in the Special Theory of Relativity? Philosophy of Science **66**, 208–220 (1999)

68. J.Winnie: Special RelativityWithout One-Way Velocity Assumptions: Part I, Philosophy of Science **37**, 81–99 (1970)

69. J. Winnie: Special Relativity Without One-Way Velocity Assumptions: Part II, Philosophy of Science **37**, 223–238 (1970)

70. R. Weingard: Relativity and the Reality of Past and Future Events, British Journal for the Philosophy of Science **23**, 119 (1972)

71. V. Petkov: Simultaneity, Conventionality and Existence, British Journal for the Philosophy of Science **40**, 69 (1989)

72. W. Salmon: The Philosophical Significance of the One-Way Speed of Light, No^us **11**, 253–292 (1977)

73. H. Ohanian: The Role of Dynamics in the Synchronization Problem, American Journal of Physics **72**, 141–148 (2004)

74. M. Jammer: *Concepts of Simultaneity: From Antiquity to Einstein and Beyond* (Johns Hopkins University Press, Baltimore 2006)

75. V. Petkov: Conventionality of Simultaneity and Reality. In: D. Dieks (Ed.), *The Ontology of Spacetime II* (Elsevier, Amsterdam 2006) pp. 175–185

76. R.M. Wald: Resource Letter TMGR-1: Teaching the Mathematics of General Relativity, American Journal of Physics **74**, 471 (2006)

77. D. Dieks: Space, Time and Coordinates in a Rotating World. In: *Relativity in Rotating Frames: Relativistic Physics in Rotating Reference Frames* (Fundamental Theories of Physics, Vol. 135), ed. by G. Rizzi, M.L. Ruggiero (Kluwer, Dordrecht, Boston, London 2004) pp. 29–42

78. C.D. Broad: *Scientific Thought* (Routledge and Kegan Paul, London 1923). Broad's defense of the growing block model is reprinted as Chap. 8 in P. van Inwagen and D. Zimmerman (Eds.): *Metaphysics: The Big Questions* (Blackwell, Malden 1998)

79. G.F.R. Ellis: Physics in the Real Universe: Time and Spacetime, General Relativity and Gravitation **38** 1797–1824, arXiv:gr-qc/0605049

80. G.F.R. Ellis: Physics in the Real Universe: Time and Space-Time. In [83] pp. 49–79

81. J. Christian: Absolute Being versus Relative Becoming. In [83] pp. 163–195, arXiv:gr-qc/0610049

82. R.D. Sorkin: Relativity Theory Does Not Imply that the Future Already Exists. In [83] pp. 153–161, arXiv:gr-qc/0703098

83. V. Petkov (Ed.): *Relativity and the Dimensionality of the World* (Springer, Berlin 2007)

84. B. Schutz: *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity* (Cambridge University Press, Cambridge 2004) p. 357

85. V. Petkov: Is There an Alternative to the Block Universe View? In: D. Dieks (Ed.), *The Ontology of Spacetime* (Elsevier, Amsterdam 2006) pp. 207–228

86. V. Petkov: Relativity, Dimensionality, and Existence. In [83] pp. 115–135

87. V. Petkov: On the Reality of Minkowski Space, Foundations of Physics **37**, 1499–1502 (2007)

88. P. Speziali (Ed.): *Albert Einstein, Correspondance avec Michelle Besso, 1903–1955* (Hermann, Paris 1979). Quoted in [90, p. 139]

89. M. Black: Review of G.J. Whitrow's *The Natural Philosophy of Time*, Scientific American **206**, 181 (1962)

90. B. Greene: *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality* (Knopf, New York 2004) p. 142

91. B. Libet: Unconscious Cerebral Initiative and the Role of Conscious Will in Voluntary Action, Behavioral and Brain Sciences **8**, 529–566 (1985)

92. C.S. Soon, M. Brass, H.-J. Heinze, and J.-D. Haynes: Unconscious Determinants of Free Decisions in the Human Brain, Nature Neuroscience **11**, 543– 545 (2008)

93. Aristotle: *Physics*, Book IV, Chap. 14. In: *Great Books of the Western World*, Vol. 7, ed. by M.J. Adler (Encyclopedia Britannica, Chicago 1993)

94. Saint Augustine: *The Confessions*, Book XI. In: *Great Books of the Western World*, Vol. 16, ed. by M.J. Adler (Encyclopedia Britannica, Chicago 1993)

95. V. Petkov:Weyl's View on the ObjectiveWorld. In: *Exact Sciences and Their Philosophical Foundations*, ed. by W. Deppert, K. Huebner, A. Oberschelp, V. Weidemann (P. Lang, Frankfurm am Main Bern New York, Paris 1988) pp. 519–524

96. J.L. Synge: *Relativity: The Special Theory*, 2nd edn. (North-Holland, Amsterdam 1965) p. vii

97. H. Ohanian, R. Ruffini: *Gravitation and Spacetime*, 2nd edn. (W.W. Norton, New York, London 1994) p. 197

98. A. Einstein, L. Infeld: *The Evolution of Physics* (Simon and Schuster, New York 1966) p. 221

99. P.A. Tipler: *Physics*, Vol. 3, 4th edn. (Freeman, New York 1999) p. 1272

100. R.L. Reese: *University Physics*, Vol. 2 (Brooks/Cole, New York 2000) p. 1191

101. R.A. Serway: *Physics*, Vol. 2, 4th edn. (Saunders, Chicago 1996) p. 1180

102. P.M. Fishbane, S. Gasiorowicz, S.T. Thornton: *Physics* (Prentice Hall, New Jersey 1993) p. 1192

103. G. Rizzi, M.L. Ruggiero (Eds.): *Relativity in a Rotating Frame* (Kluwer, Dordrecht 2003)

104. I.I. Shapiro: Phys. Rev. Lett. **13**, 789 (1964)

105. I.I. Shapiro: Phys. Rev. **141**, 1219 (1966)

106. E.F. Taylor, J.A. Wheeler: *Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity* (Addison Wesley Longman, San Francisco 2000) p. E-1

107. A. Harpaz, N. Soker: Gen. Rel. Grav. **30**, 1217 (1998); see also physics/9910019

108. W. Rindler: Am. J. Phys. **36**, 540 (1968)

109. A. Einstein: Ann. Phys. **49** (1916). In: [12] pp. 111–164

110. L. Lerner: Am. J. Phys. **65**, 1194 (1997)

111. N.M.J. Woodhouse: General Relativity (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2006) p. 9

112. E. Fermi: Nuovo Cimento **22**, 176 (1921)

113. D.J. Griffiths: *Introduction to Electrodynamics*, 2nd edn. (Prentice Hall, London 1989) p. 416

114. W.K.H. Panofsky and M. Phillips: *Classical Electricity and Magnetism*, 2nd edn. (Addison-Wesley, Massachusetts, London 1962) p. 342

115. R.P. Feynman, R.B. Leighton and M. Sands: *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 2 (Addison-Wesley, New York 1964) p. 21-10

116. M. Schwartz: *Principles of Electrodynamics* (Dover, New York 1972) p. 213

117. J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edn. (Wiley, New York 1999) p. 664

118. F. Rohrlich: *Classical Charged Particles* (Addison-Wesley, New York 1990) p. 218

119. M. von Laue: *Relativitätstheorie*, 3rd edn., Vol. 1 (Frederick Vieweg und Sohn, Braunschweig 1919)

120. T. Fulton, F. Rohrlich: Ann. Phys. **9,** 499 (1960)

121. F. Rohrlich: Ann. Phys. **22,** 169 (1963)

122. B.S. DeWitt and R.W. Brehme: Ann. Phys. **9,** 220 (1960)

123. W. Rindler: *Essential Relativity* (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1997) p. 244

124. J.L. Synge: *Relativity: The General Theory* (Nord-Holland, Amsterdam 1960) p. 109

125. J.J. Thomson: Phil. Mag. **11,** 229 (1881)

126. O. Heaviside: *The Electrician* **14,** 220 (1885)

127. G.F.C. Searle: Phil. Mag. **44,** 329 (1897)

128. M. Abraham: *The Classical Theory of Electricity and Magnetism*, 2nd edn. (Blackie, London 1950)

129. H.A. Lorentz: Proceedings of the Academy of Sciences of Amsterdam **6,** 809 (1904)

130. H.A. Lorentz: *Theory of Electrons*, 2nd edn. (Dover, New York 1952)

131. H. Poincar´e: Compt. Rend. **140,** 1504 (1905)

132. H. Poincar´e: Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo **21,** 129 (1906)

133. E. Fermi: Phys. Zeits. **23,** 340 (1922)

134. E. Fermi: Rend. Acc. Lincei (5) **31,** 184; 306 (1922)

135. E. Fermi: Nuovo Cimento **25,** 159 (1923)

136. H. Mandel: Z. Physik **39,** 40 (1926)

137. W. Wilson: Proc. Phys. Soc. **48,** 736 (1936)

138. M.H.L. Pryce: Proc. Roy. Soc. A **168**, 389 (1938)

139. B. Kwal: J. Phys. Rad. **10**, 103 (1949)

140. F. Rohrlich: Am. J. Phys. **28**, 639 (1960)

141. M. Jammer: *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics* (Dover, New York, 1997), Chap. 11. See also [142]

142. M. Jammer: *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy* (Princeton University Press, Princeton, 2000) p. 34

143. J.W. Butler: Am. J. Phys. **37**, 1258 (1969)

144. E. Mach: *Science of Mechanics*, 9th edn. (Open Court, London 1933)

145. P. Pearle: Classical Electron Models. In: *Electromagnetism: Paths to Research*, ed. by D. Teplitz (Plenum Press, New York 1982) pp. 211–295

146. D. Bender et al: Phys. Rev. D **30,** 515 (1984)

147. M.H. MacGregor: *The Enigmatic Electron* (Kluwer, Dordrecht 1992)

148. D. Hestenes, A. Weingartshofer (Eds.): *The Electron: New Theory and Experiment* (Kluwer, Dordrecht 1991)

149. M. Springford (Ed.): *Electron: A Centenary Volume* (Cambridge University Press, Cambridge 1997)

150. B. Podolsky, K.S. Kunz: *Fundamentals of Electrodynamics* (Marcel Dekker, New York 1969) p. 288

151. M.K. Gaillard, P.D. Grannis, and F.J. Sciulli: Rev. Mod. Phys. **71**, No. 2 S96 (1999)

152. A. Einstein: Ann. Phys. **20**, 627 (1906)

153. D.L. Livesey: *Atomic and Nuclear Physics* (Blaisdell, Massachusetts 1966) p. 117

154. D. J. Griffiths and R. E. Owen: Am. J. Phys. **51**, 1120 (1983)

155. R. Feynman: *The Character of Physical Law* (The MIT Press, Massachusetts 1967) p. 129

156. A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki, and H. Exawa, Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern, American Journal of Physics **57** (1989) pp. 117-120

157. A.H. Anastassov: The Theory of Relativity and the Quantum Action (4-Atomism), DSc Thesis, Sofia University, Sofia (1984); *The Theory of Relativity and the Quantum Action* (Nautilus, Sofia 2003), in Bulgarian

158. A.H. Anastassov: Annuaire de l'Universit´e de Sofia, St. Kliment Ohridski, Facult´e de Physique, **81**, 135 (1993)

159. *Encyclopedia of Physics*, 2nd edn, ed. by R.G. Lerner and G.L. Trigg (VCH Publishers, New York 1991) p. 721

160. J. Trefil: *The Nature of Science* (Houghton Mifflin, Boston New York 2003) p. 98

161. B.G. Kuznetsov: *Einstein and Dostoyevsky* (Hutchinson, London 1972)

معجم المصطلحات

3D/4D dilemma	معضلة ثلاثي الأبعاد/رباعي الأبعاد
4/3 factor	معامل 4/3
4-atom	ذرة رباعية
4-atomism	ذرية رباعية
absolute	مطلق
absolute motion	حركة مطلقة
absolute rest	السكون المطلق
absolute space	الفضاء (المكان) المطلق
absolute uniform motion	حركة منتظمة مطلقة
absoluteness	المطلقية
accelerated	متسارع
active gravitational	ثقالية فعالة
Aristotelian doctrine of motion	مذهب أرسطو للحركة
atomism	المذهب الذري (الذرية)
attraction	الجذب
block universe	كون كتلي
bodies	أجسام
charge	شحنة
classical mechanics	ميكانيكا كلاسيكية
classical model	نموذج كلاسيكي

clock	ساعة
coming-into-being hypersurface,	السطح الفوقي الناشيئ
comoving	ملازم للحركة
Compton frequency, 270, 274	تردد كومبتون
confirmation	تأكيد
consciousness	وعي
consciousnessless	لاوعي
constancy of speed of light	ثبوت سرعة الضوء
continuous in time	متصل في الزمن
conventional	اصطلاحي
conventionality	اصطلاحية
Copenhagen interpretation	تفسير كوبنهاجن
Copernican revolution	ثورة كوبرنيكية
Copernican system	نظام كوبرنيكي
correct	سليم
correspondence principle	مبدأ التناظر
Coulomb field	مجال كولوم
curved	منحني، مقوس
deductive	استنباطي
deformed	مشوه
detector	كاشف
dimensionality	بعدية
dipole moment	عزم ثنائى القضب
discontinuous in time	منفصل فى الزمن

discreteness in space and time	انعدام ترابط فى الفضاء (المكان) والزمان
displacement	إزاحة
distorted	مشوش
Dostoevsky's method of cruel experimentation	طريقة ديستوفسكى للتجريب الصارم
double-slit experiment	تجربة الشق المزدوج
Einstein's field theory	نظرية المجال لآينشتين
Eleatic school of philosophy	المدرسة الإليائية للفلسفة
Eleatics	الإليائية (العلم الإليائي)
electric field	مجال كهربي
electrodynamics	الديناميكا الكهربية
electromagnetic disturbance	إطراب كهرمغناطيسي
electron	إلكترون
empty	فارغ
entity	كيان
epistemological	إبستمولوجي
epistemological aspect	الجانب الإبستمولوجي (المعرفي)
equivalence principle	مبدأ التكافؤ
Euclidean space	الفضاء الإقليدي
event	حدث
event solipsism	أنانة الحدث
existence	وجود
experiment	تجربة
experimental evidence	دليل تجريبى

external world	عالم (كون) خارجي
fictitious	خيالي
fifth force	قوة خامسة
fifth interaction	تآثر خامس
Flat	مسطح
flow of time	انسياب الزمن
fluid-like	شبه مائع
force	قوة
four-dimensional	رباعي الأبعاد
four-dimensionalist view	رؤية البعدية الرباعية
four-dimensionality	البعدية الرباعية
four-momentum	كمية تحرك رباعية
four-vector	متجه رباعي
four-velocity	سرعة رباعية
frame of reference	إطار إسناد (مرجعي)
frame-dependent	معتمد على الإطار
frame-independent	غير معتمد على الإطار
free will	إرادة حرة
frozen	مجمد
frozenness	لامتجمد
future	مستقبل
general relativity	نسبية عامة
genetics	علم الجينات
geocentric system	نظام مركزية الأرض

geodesic path	مسار جيوديسي
geometry	هندسة
gravitational	ثقالي
gravitational interaction	تأثر ثقالي
gravity	جاذبية
growing	متنامي
heliocentric model	نموذج مركزية الشمس
hidden deduction	استنباط خفي
hidden knowledge	معرفة خفية
Higgs force	قوة هيجز.
Hume's problem	مشكلة هيوم
hypothetico-deductive method	منهج فرضي استنباطي
incommensurability	لا قياسية (بنفس الوحدات)
incorrect	غير سليم
induction	استقراء
inductive	استقرائي
inertia	قصور ذاتي
inertial	قصورى
inertial force	قوة قصورية
inference	استنتاج
information-collecting sphere	كرة تجميع المعلومات
instantaneous	لحظي
interactions	تأثرات
interference experiments	تجارب تداخل

internal logic	منطق داخلي
isotropic	متماثل الخواص اتجاهيًا
justification	تبرير
kinetic energy	طاقة حركة
length contraction	تقلص طول
level	مستوى
Liénard–Wiechert potentials	جهود لينارد– فايتشيرت
light cone	مخروط ضوئي
light wave	موجة ضوئية
light-like	شبه ضوئي
local	موضعي (محلي)
localized particle	جسيم متموضع
Lorentz invariance	لامتغير لورنتز
luminiferous ether	أثير مضيء
macroscopic level	مستوى ماكروي
magnetic field	مجال مغناطيسي
many spaces	أفضية عديدة
Mass	كتلة
Materialistic	مادي
Matter	مادة
Maxwell's electrodynamics	كهرديناميكا ماكسويل
Michelson–Morley experiment	تجربة مايكلسون – مورلي
microscopic level	مستوى ميكروي
mind-dependent	معتمد على العقل

Minkowski spacetime	زمكان مينكوفسكي
Minkowski world	كون مينكوفيسكي
Motion	حركة
Motionless	عديم الحركة
multi-dimensional	متعدد الأبعاد
muon experiment	تجربة الميون
Nature	الطبيعة
Neuroscience	علم الأعصاب
Newton's second law	قانون نيوتن الثاني
Newton's third law	قانون نيوتن الثالث
Newtonian mechanics	الميكانيكا النيوتونية
non-geodesic	لاجيوديسي
non-gravitational nature	طبيعة لاثقالية
non-inertial	لاقصوري
Now	الآن
Objective	موضوعي
objective becoming	صيرورة موضوعية
objective probabilism	احتمالية موضوعية
objectively probabilistic behaviour	السلوك الاحتمالي موضوعيًا
observer-dependent	معتمد على المراقب
observer-independent	غير معتمد على المراقب
off-mass-shell particles	جسيمات بلا غلاف كتلة
one-way velocity of light, 156, 157	سرعة الضوء في اتجاه واحد
ontological aspect	الجانب الأنطولوجي (الوجودى)

ontological relativization	نسبنة وجودية (أنطولوجية)
ontologically relativized	منسبن وجوديًا (أنطولوجيًا)
Ontology	أنطولوجيا (علم الوجود المادي)
open question	سؤال مفتوح
Origin	أصل
Particle	جسيم
passive gravitational mass	كتلة ثقالية مطاوعة
Past	ماضي
philosophy of mind	فلسفة العقل
Photon	فوتون
physical laws	قوانين فيزيائية
physical meaning	معنى فيزيائي
Planck's constant	ثابت بلانك
point-like particle	جسيم شبه نقطي
Preferred	مفضل
pre-relativistic division	تقسيم قبل نسبوي
present	حاضر
presentism	الآنية
presentists	الآنيون
presents	أزمنة الحاضر
probabilistic	احتمالي
probabilistic laws	قوانين احتمالية
probabilistic theory	نظرية احتمالية
probability	احتمال

proper	حقيقي
proper length	طول حقيقي
proper time	زمن حقيقي
proton	بروتون
pseudo-Euclidean version	الصورة الإقليدية الزائفة
Ptolemaic system	النظام البطلمي
Pythagorean theorem	نظرية فيثاغورس
quantized	كمومي، كوانتي
quanton	كوانتون
quantum	كم، كوانتم
quantum electrodynamics	الكهرديناميكا الكمومية
quantum entanglement	تشابك كمومي
quantum field theory	نظرية المجال الكمومية
quantum gravity	جاذبية كمومية
quantum mechanics	ميكانيكا الكم
quantum object	أجسام كمومية
quantum paradox	مفارقة كمومية
quantum phenomena	الظواهر الكمومية
real	واقعي
real collapse	انهيار واقعي
reasoning	استدلال
reciprocity	تبادلية
redshift	انزياح أحمر
reference frame	إطار إسناد

relationism	العلاقاتية
relative	نسبي
relativistic	نسبوي
relativistic causality	سببية نسبوية
relativistic effects	تأثيرات نسبوية
relativity of motion	نسبية الحركة
relativity of simultaneity	نسبية التزامن
relativization	نسبنة
relativized	منسبن
relativized version	التصور المُنَسْبَن
reliability of scientific knowledge	موثوقية المعرفة العلمية
resistance	مقاومة
rest	سكون
restoring force	قوة استرداد
Riemann tensor	ممتد ريمان
Rietdijk–Putnam–Maxwell argument	حجة ريتديجك – بوتنام – ماكسويل
rod	قضيب
Sagnac effect	تأثير ساجناك
Schrödinger cat paradox	مفارقة قطة شرودنجر
Schwarzschild metric	مقياس شوارزتشايلد
scientific theories	نظريات علمية
Shapiro time delay	تأخر زمن شابيرو
simultaneity	تزامن
space	مكان (فضاء)

space-like	شبه فضائي
spacetime	زمكان
spatially extended	ممتد مكانيًا
special relativity	نسبية خاصة
spin	تدويم، لفّ
standard interpretation	التفسير النموذجي
Standard Model	النموذج المعياري
straight	مستقيم
strain tensor	ممتد الانفعال
stress	إجهاد
stress tensor	ممتد الإجهاد
string theory	نظرية الأوتار
strong	قويّ
substantivalism	الجوهرية
temporal becoming	صيرورة زمانية
thought experiment	تجربة فكرية
three-dimensional	ثلاثي الأبعاد
time dilation	تمدد الزمن
time-like	شبه زمني
translatability	قابلية التحويل
triangle inequality	متباينة المثلث
true explanation	تفسير حقيقي
twin paradox	مفارقة التوأم
two-dimensional	ثنائي الأبعاد

ultimate judge	حكم نهائى
undistorted	غير مشوش
validity	صحة
velocity	سرعة
virtual particles	جسيمات افتراضية
volume element	عنصر حجمي
W boson	بوزون W
wave function	دالة موجة
weak	ضعيف
world	كون
worldline	خط كوني
worldtube	أنبوب كوني
Z boson	بوزون Z

المؤلف في سطور:

فيسيلين بيتكوف

حصل على الدرجة الجامعية فى الفيزياء من جامعة صوفيا، وعلى الدكتوراه فى الفلسفة من معهد البحوث الفلسفية بالأكاديمية البلغارية للعلوم، وعلى الدكتوراه فى الفيزياء من جامعة كونكورديا فى مونتريال بكندا. قام بالتدريس فى جامعة صوفيا، وحاليا يحاضر فى جامعة كونكورديا فى الفيزياء والفلسفة وفلسفة العلم. وهو مهتم أساسا بالبحث فى الأساسيات الفيزيائية وتضميناتها المعمقة لفهمنا للعالم، وهو عضو فى مجلس إدارة الجمعية الدولية لدراسة الزمكان المتقدمة.

المُترجِم في سطور:

د. محمد أحمد فؤاد باشا

أستاذ الفيزياء المساعد، ورئيس الفريق البحثي لمشروع إنشاء مركز الفيزياء الفلكية وعلوم الفضاء، بكلية العلوم – جامعة القاهرة.

- خبير مجمع اللغة العربية بالقاهرة.
- مستشار مكتب براءات الاختراع المصري بأكاديمية البحث العلمي والتكنولوجيا.
- عضو مشارك في اللجنة الدولية لأبحاث الفضاء (COSPAR)
- عضو الجمعية المصرية لتاريخ العلوم، والجمعية المصرية الفيزيقية، والجمعية المصرية للعلوم الفيزيائية والرياضية، والجمعية المصرية لعلوم المواد وتطبيقاتها، وجمعية التراث العلمي للحضارة الإسلامية.
- قام بتحكيم العديد من الأبحاث في الدوريات العلمية الدولية المتخصصة، وعدد من المسابقات العلمية المحلية.
- شارك فى العديد من المؤتمرات وورش العمل المتخصصة، وله العديد من الأبحاث في مجال العلوم والمواد ومجال الفيزياء الفلكية للطاقات العالية.

- يشارك في تعريب مجلة "Scientific American" – "العلوم" التى تصدرها مؤسسة الكويت للتقدم العلمى، ومن ترجماته أيضاً: سلسلة "العلم من حولك" تأليف "سوزان مارتينو" (٢٠٠٩م)، و"رياضيات مستوى متقدم: الميكانيكا (١)" تأليف "دوجلاس كوادلينج" (٢٠١٢).
- من مؤلفاته (بالاشتراك): "الفيزياء العملية وتجارب المحاكاة" (٢٠٠٧م)، و"نحو موسوعة مبسطة فى علوم الفلك وتكنولوجيا الفضاء" (٢٠٠٨م)، كما شارك في وضع مداخل "موسوعة أعلام العلماء العرب والمسلمين" التي أعدتها المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم (ALECSO).

التصحيح اللغوى: سمـــاح حامد

الإشـــراف الفنى: حســـن كامل

أكثر الأسئلة أهمية فى هذا الكتاب هو: "ما طبيعة (الوضع الأنطولوجى) الزمكان؟"، أو، بصورة مكافئة "ما هى بُعدية الكون على المستوى الماكروي؟" جاءت الإجابة على هذا السؤال من خلال تحليل تفضيلى للتأثيرات النسبوية، والسؤال صراحة عما إذا كانت الأجسام المتضَّمنة فى هذه التأثيرات ثلاثية الأبعاد أو رباعية الأبعاد. حيث لا وجود للتأثيرات النسبوية الكينماتية ولا إمكانية لإثبات تجريبي يدعمها. نوقشت تضمينات هذه النتيجة فى الفيزياء والفلسفة ورؤيتنا الكلية للعالم. زودت هذه الطبعة الجديدة بأقسام وملاحق وملاحظات ومراجع جديدة. كما تضمنت معالجة تفصيلية ومقنعة عوضت أوجه القصور فى الطبعة السابقة وأضافت تطورات جديدة فى المجال.

تصميم الغلاف: أحمد بلال